VERGLEICHENDE MAGNETISCHE UNTERSUCHUNGEN AN RINGEN AUS EISEN UND EISENSILIZIUMLEGIERUNGEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

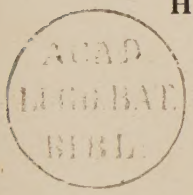
DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

VEREINIGTEN FRIEDRICHS-UNIVERSITÄT

HALLE-WITTENBERG



VORGELEGT VON

MARTIN OTTO

AUS **MOYS** (SCHLESIEN).

HALLE a. S.

HOFBUCHDRUCKEREI VON C. A. KAEMMERER & CO.

1909.

Referent: Geheimer Regierungs-Rat Prof. Dr. **E. Dorn**.

Meinen lieben Eltern!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548101_0088

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung 7
II. Die Versuchsanordnung 9
1. Material und Anfertigung der Ringe 9
2. Primärkreis 11
3. Sekundärkreis 13
4. Formeln zur Berechnung von $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$ . . . 15
5. Die Daten der Ringe 17
III. Die Magnetisierungsversuche 18
1. Die Normalkurven 21
2. Einfluss verschiedener Stufenzahlen auf die Maximalinduktion 26
3. Einfluss des Siliziums auf Koerzitivkraft und Hysteresisverlust 33
IV. Untersuchungen über die magnetische Nachwirkung 36
V. Kurze Zusammenfassung 42

I. Einleitung.

Die magnetischen Eigenschaften von Eisen und Stahl sind nicht nur von der thermischen Behandlung des Materials, sondern auch von der chemischen Zusammensetzung in hohem Grade abhängig. So kann der Gehalt des Eisens an gewissen Substanzen die Ursache einer bedeutend erhöhten Magnetisierbarkeit sein, während die Hinzufügung anderer Elemente ein fast unmagnetisches Material entstehen lässt.

Umfassende Untersuchungen über diese Verhältnisse haben W. Barrett, W. Brown und R. Hadfield[1]) ausgeführt, welche in systematischer Weise vorgehend Eisen mit einer ganzen Reihe von Elementen in verschiedenstem Prozentgehalte legierten und die thermischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften der erhaltenen Substanzen feststellten. Betreffs der magnetischen Eigenschaften ergab sich, dass namentlich ein geringer Zusatz von Silizium oder Aluminium dem Eisen eine höhere Permeabilität verleiht, während andererseits die überhaupt erreichbaren Höchstwerte der Induktion und der Energieverlust durch Hysteresis abnehmen.

Im Wesentlichen dieselben Ergebnisse hatten die Versuche von T. Baker[2]) an Stäben aus Eisen und 4 Eisensiliziumlegierungen von verschiedenem Prozentgehalte.

---

1) Trans. Roy. Dublin Soc. (2) 7. 1900. Die Ergebnisse wurden diskutiert von E. Gumlich, Elektrot. Zeitschr. 23, 1902. S. 101.

2) T. Baker: »The magnetic properties of some alloys of iron and silicon.« Journ. of the Inst. of Electr. Engin. 34, 1905. S. 498.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Eisensiliziumlegierungen, die bereits von Barrett, Brown und Hadfield, sowie von allen späteren Beobachtern festgestellt wurde, besteht in dem hohen spezifischen elektrischen Widerstande, welcher etwa 5 mal so gross ist als bei gewöhnlichem Eisen.

Dies sowohl wie die oben erwähnte höhere Permeabilität und der geringere Hysteresisverlust sind für die Technik von grosser Bedeutung geworden, allerdings erst, nachdem die anfänglichen Schwierigkeiten, die sich dem Auswalzen des neuen Materials zu Blechen (der für den Bau von Dynamoankern und Transformatoren einzig geeigneten Form) entgegenstellten, überwunden waren.

Seitdem sind an diesen „legierten Blechen" vielfach magnetische Untersuchungen ausgeführt worden, welche nicht nur die Resultate der schon genannten Autoren bestätigt, sondern nach vielen Richtungen hin ergänzt und erweitert und so für die praktischen Bedürfnisse der Technik höchst wertvolle Ergebnisse geliefert haben.

Es schien nun von Interesse, die zuerst von E. Gumlich und E. Schmidt,[1]) später u. a. von F. Rücker[2]) und R. Reinicke[3]) ausgeführten Untersuchungen über die Abhängigkeit der magnetischen Verhältnisse von der Stufenzahl des Magnetisierungsprozesses auch auf die legierten Bleche auszudehnen und weiterhin die magnetische Nachwirkung des Näheren zu studieren, in dem Bestreben, einen eventuellen Einfluss des Siliziumgehaltes auf die genannten Erscheinungen festzustellen. Auf freundliche Anregung und mit steter gütiger Unterstützung von Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn habe ich im hiesigen Physikalischen Institut eine Lösung der aufgeworfenen Fragen unternommen, wobei dann die hierzu ausgeführten Versuche Gelegenheit gaben, auch die Koerzitivkraft und den Hysteresisverlust in ihren

1) E. T. Z. 21. 1900. S. 233.
2) Inaug.-Diss. Halle 1905.
3) Inaug.-Diss. Halle 1908.

relativen Grössenverhältnissen zu ermitteln. Ausserdem, und zwar geschah dies zu allererst, gab eine allgemeine Untersuchung Aufklärung über die durch Silizium bewirkten Änderungen der Magnetisierbarkeit überhaupt.

II. Die Versuchsanordnung.

1. Material und Anfertigung der Ringe.

Das meinen Untersuchungen zugrunde liegende ca. 0,3 mm starke Eisenblechmaterial stammte aus dem Hüttenwerk in Thale und bestand aus einer Probe gewöhnlichen Eisenblechs und drei Proben, welche Silizium in verschiedenen Mengen (nach Angabe der Hütte 0,61 %, 1,94 %, 4,55 %) enthielten. Ob etwa sonst noch andere Beimengungen in nennenswertem Betrage vorhanden waren, entzieht sich meiner Kenntnis.

Die magnetischen Eigenschaften von Blechen können im Wesentlichen auf 2 verschiedene Arten untersucht werden: entweder nach der magnetometrischen Methode mittels eines aus schmalen Blechstreifen zusammengesetzten Bündels, das dann mit der Magnetisierungsspule umgeben wird — oder ballistisch mit Verwendung eines geschlossenen magnetischen Kreises. Für die vorliegenden Zwecke konnte nur diese letzte Methode in Betracht kommen, da möglichst genaue Magnetisierungskurven erzielt werden sollten, was bei Benutzung eines Blechbündels infolge des nur sehr ungenau bekannten Entmagnetisierungsfaktors nicht möglich ist. Es wurden daher ringförmige Untersuchungsobjekte angefertigt; ihre Herstellung geschah auf folgende Weise:

Aus den Blechtafeln wurden Kreisringe von 12 cm äusserem Durchmesser und 0,5 cm Breite, alle von möglichst gleicher Grösse, ausgeschnitten und nach sorgfältigem Ab-

schmirgeln, Ausmessen[1]) und Wägen derart aufeinander geschichtet, dass zwischen je zweien ein Ring aus Isolierpapier[2]) zu liegen kam. Das Einfügen des Isolierpapiers, welches nach innen und aussen die Eisenringe ein wenig überragte, geschah, um jede gegenseitige Berührung der letzteren und damit ein Übergehen von Wirbelströmen vollkommen auszuschliessen. Festen Halt bekam das Ganze durch Umwickeln mit Isolierband, worauf weiterhin eine Lage Seidenband folgte. In dieser Form wurde der Ring mittels Dickenmessers nochmals nach Dicke und Breite ausgemessen,[3]) doch konnte dies nur angenähert geschehen, weil durch die Umwicklung mit Band keine glatte Oberfläche zu erhalten war und überdies der Querschnitt keine geometrisch genau definierbare Form darstellte.

Nunmehr folgte die sekundäre Wicklung, bestehend aus 0,5 mm dickem doppeltseidebesponnenen Kupferdraht in einer Lage. Um eine gute Isolation der Sekundärspule gegen die Primärspule zu erzielen, kam jetzt ein Schellacküberzug (aufgetragen in alkoholischer Lösung), der nach dem Trocknen noch mit Seidenband umgeben wurde. Es folgten darauf die Primärwindungen aus 1 mm dickem gewachsten Kupferdraht in 2 Lagen. Um ein Einsinken der zweiten Lage in die Zwischenräume, die sich notwendigerweise an der Aussenseite der erste Lage befinden, zu verhüten, umgab ich letztere mit einer Paraffinschicht und beseitigte deren glatte Oberfläche durch Umwinden mit Seidenband. Schliesslich erhielt die zweite Lage der Primärwindungen noch einen Schellacküberzug. Dies geschah, um zu verhindern, dass das Petroleum des Bades, in welches der Ring später gebracht wurde, durch etwa vorhandene kleine Zwischenräume ins Innere drang, dort das Paraffin löste und eine Lockerung der Primärwindungen bewirkte.

1) Nähere Angaben s. S. 15.

2) Dieses stammte ebenso wie der zum Befestigen des Papiers auf dem Eisen verwendete Isolierlack aus der Fabrik von Meirowsky in Cöln-Ehrenfeld.

3) Über die Verwertung dieser Messung vgl. S. 17.

2. Primärkreis.

Die magnetische Untersuchung ringförmiger Gebilde kann nur mittels der ballistischen Methode, d. h. unter sprungweiser Änderung der magnetischen Feldstärke, vorgenommen werden.

Nun bleibt aber die Anzahl der Sprünge bis zur Erreichung einer gewissen Maximalfeldstärke immer willkürlicher Wahl unterworfen und kann, wie die eingangs[1]) erwähnten Arbeiten gezeigt haben, unter Umständen einen bedeutenden Einfluss auf die maximale Induktion ausüben.

Gerade dieses Problem war aber auch Gegenstand eines Teiles meiner Aufgabe. Es war daher stets nötig, eine Änderung des Magnetisierungsstromes (der Feldstärke) um immer möglichst gleiche Beträge vorzunehmen. Hierfür stand mir ein von Herrn Geheimrat Prof. Dr. Dorn entworfener Bügelrheostat zur Verfügung, der schon mehrfach denselben Zwecken im hiesigen Institut gedient und sich dabei aufs beste bewährt hatte.

Mit Rücksicht auf die von Rücker[2]) gegebene Darstellung will ich von einer genauen Erklärung des Rheostaten absehen und nur das Prinzipielle seiner Einrichtung angeben:

Der Apparat gestattet nämlich, durch sukzessives Parallelschalten von jeweils einer der vorhandenen 24 unter sich gleichwertigen Widerstandsrollen, dass der zunächst eingeschaltete Widerstand auf $^1/_1$, $^1/_2$, $^1/_3$ . . . . $^1/_{24}$ seines Wertes herabgesetzt, also die Stromstärke bei konstanter elektromotorischer Kraft im Verhältnis 1:2:3 . . . . :24 gesteigert werden kann. Derselbe Weg kann natürlich auch in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen werden. Es ist nun weiterhin die Einrichtung getroffen, nicht nur die einzelnen Rollen nacheinander parallel schalten zu können, sondern auch je 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 auf einmal, wobei zwar immer dieselbe Maximalstromstärke erreicht wird, aber mit verschiedener Stufenzahl 24, 12, 8, 6, 4, 3, 2, 1. Ich benutzte

1) S. 8.
2) l. c. Seite 11 ff.

nicht alle diese 8 verschiedenen Stufenzahlen, sondern beschränkte mich durchweg auf die Stufen 1, 3, 6, 12, 24, weil die Anwendung dieser bereits vollkommen die vorhandenen Unterschiede in der Maximalinduktion erkennen liess; häufig kam ich sogar mit noch weniger aus.[1])

Der Rheostat kann seinen Zweck, nämlich den Magnetisierungsstrom um eine bestimmte Anzahl gleicher Beträge zu ändern, nur dann genau erfüllen, wenn der im ganzen übrigen Stromkreise vorhandene Widerstand gegen den des Rheostaten selbst verschwindet. Praktisch ist dies ausgeschlossen, zumal ja schon die Primärwindungen bei sämtlichen Ringen einen merklichen Widerstand aufweisen. Vor allem aber war es nicht angängig, den zur Erzeugung schwacher Felder nötigen Strom durch Einschalten von Ballastwiderstand herzustellen.

Eine Stromabzweigung half hier aus: Der von den Akkumulatoren A (Fig. 1) gespeiste Hauptstrom läuft durch den technischen Regulierwiderstand T und einen gerade ausgespannten 2 mm dicken Manganindraht m n, von dem aus in m, einer festen, und o, einer verschiebbaren Klemme, der eigentliche Magnetisierungsstrom abgezweigt wird. B ist der Bügelrheostat, V_1 ein Viernapf zum Kommutieren des Stromes, W soll die primäre Ringwicklung andeuten und G_i ein strommessendes Instrument. Hierzu konnte für schwache Ströme kein Präzisionsamperemeter verwendet werden, da ein solches bei der Stöpselung 0,001 Amp. und 0,01 Amp. einen zu hohen Widerstand besitzt und sehr ungleiche Stufen herbeiführt. Es wurde daher abermals eine Stromverzweigung angewendet und ein Manganindraht pq eingefügt, dessen Enden mit dem (zu einem Pyrometer von Siemens & Halske gehörigen) Galvanometer G_1 verbunden sind. Die Länge von pq kann so bemessen werden, dass für einen gewissen Bruchteil eines Ampere eine Ablenkung von 1 Skalenteil an G_1 (das übrigens einen Ausschlagsbereich von 180 Skt. besitzt) erfolgt.

1) Siehe die Tabellen 7—23.

Mir standen von den Untersuchungen von Rücker[1]) und Reinicke[2]) vier solche Nebenschlüsse zur Verfügung und ich beschränkte mich darauf, sie mittels eines Präzisionsamperemeters nachzuprüfen und erforderlichenfalls zu korrigieren. Ihre Aichung ist derartig, dass ein Skalenteil bei

I	II	III	IV	
$^1/_{1000}$	$^1/_{360}$	$^1/_{180}$	$^1/_{100}$	Amp.

entspricht und daher die maximale messbare Stromstärke

0,18	0,5	1,0	1,8	Amp.

beträgt.

Ausser der in Fig. 1 gezeichneten Primärstromschaltung habe ich noch eine etwas abgeänderte Schaltung (Fig. 1a) benutzt, indem nämlich p nicht mit m, sondern mit s verbunden wurde, sodass jetzt der Stromweg s T n o im Nebenschluss lag, während bei Fig. 1 dieser Nebenschluss gebildet wurde durch das kurze Stück m o. Diese Anordnung bewahrt das Prinzip der Abzweigung und macht ausserdem durch Einschalten des Regulierwiderstandes T in den Nebenschluss diesen in weiten Grenzen variabel, was namentlich für die Einstellung stärkerer Felder mancherlei Vorteile bietet. Hierbei trat dann noch insofern eine Abänderung der bisher beschriebenen Anordnung ein, als statt des strommessenden Galvanometers G_1 mit Nebenschluss ein Präzisionsamperemeter mit 0,1 Amp. Stöpselung Verwendung fand.

3. Sekundärkreis.

Jede plötzliche Änderung der magnetischen Induktion wird bei der ballistischen Methode bestimmt durch Messung der Elektrizitätsmenge, welche durch die Variation der Gesamtkraftlinienzahl innerhalb der Sekundärspule (in Fig. 1 durch W_1 angedeutet) in dieser ins Fliessen gebracht wird. Das hierzu verwendete Edelmann'sche Drehspulengalvanometer nach Deprez-d'Arsonval (G_2), welches bei vorhandener Dämpfung eine Schwingungsdauer von 12,5 sec.

1) l. c.
2) l. c.

besass, war auf einer in die Wand eingelassenen Steinplatte aufgestellt und etwa 4 m von der Millimeterskala entfernt. Die Ablesungen erfolgten mittels eines grossen Steinheilfernrohres.

Es war vielfach nötig, zur Messung der Ausschläge die Empfindlichkeit des Galvanometers auf $n_1 = {}^1/_{10}$ bezw. $n_2 = {}^1/_{100}$ der normalen herabzusetzen. Dies konnte aber nicht durch blosses Einschalten von Widerstand bewirkt werden, weil dann die Dämpfung verändert und infolgedessen ein Vergleichen der Ausschläge bei verschiedener Empfindlichkeit erschwert worden wäre. Man kann aber durch eine passende Vereinigung[1]) von Nebenschluss- und Vorschaltwiderständen eine Herabsetzung der Empfindlichkeit erreichen, ohne dass dabei die Dämpfung eine Änderung erleidet. In Fig. 1 stellen X_1 und X_2 die aus bifilar gewickeltem Kupferdraht bestehenden Nebenschlüsse dar und der Kurbelrheostat K sowie der Universalwiderstand U die entsprechenden Vorschaltwiderstände.

Die Aichung des Galvanometers, d. h. Reduktion seiner Ausschläge auf absolutes Mass, geschah mit Hilfe zweier hintereinander in den Sekundärkreis eingeschalteter Magnetinduktoren M_1 (17 Windungen) und M_2 (ca. 250 Windungen). Die durch M_1 induzierte elektromotorische Kraft ermittelte ich durch Beziehung auf die mit Hilfe eines Erdinduktors bestimmte Vertikalkomponente des Erdmagnetismus. Aus zahlreichen Beobachtungen ergab sich als Mittel:

$$e_1 = 27630 \text{ [C. G. S.]}.$$

M_1 benutzte ich in der Regel bei normaler Empfindlichkeit oder $n_1 = {}^1/_{10}$. Für $n_2 = {}^1/_{100}$ erwiesen sich die durch M_1 erhaltenen Ausschläge zu klein; zur Vermeidung von Fehlern verwendete ich alsdann M_2, welcher seinerseits auf M_1 bezogen war und eine induzierte elektromotorische Kraft von

$$e_2 = 457700 \text{ [C. G. S.]}$$

1) Theorie und Berechnung bei Wilh. Volkmann: Nebenschlusskasten zum Drehspulengalvanometer. Drud. Ann. 10. 1903. S. 217.

lieferte. Die grösste Abweichung vom Mittelwert betrug bei e_1 $^3/_8{}^0/_0$, bei e_2 $0{,}1{}^0/_0$.

Durch den Viernapf V_2 kann bewirkt werden, dass die Ausschläge des Galvanometers immer nach derselben Seite erfolgen, und Viernapf V_3 gestattet, das Galvanometer kurz zu schliessen.

Alle Rheostate, Viernäpfe und Klemmen im Sekundärkreise waren durch sorgfältiges Einpacken in Watte möglichst vor Thermoströmen geschützt.

Der Ring R wurde, wie schon S. 10 erwähnt, in ein Petroleumbad getaucht und hing zur Abschwächung von Erschütterungen frei schwebend an einem geeigneten Holzgestell.

4. Formeln zur Berechnung von $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$.

Für ein kreisringförmiges Solenoid, wie es die Primärspulen der Ringe in grosser Annäherung darstellen, ist die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ in Gauss gegeben durch die Formel:

$$\mathfrak{H} = \frac{0{,}2 \cdot N}{r} \cdot i, \tag{1}$$

worin

N die Gesamtwindungszahl der Primärspule,
i die Stromstärke in Ampere und
r den Radius des Leitkreises bedeuten.

Über die Bestimmung von r mögen an dieser Stelle einige Bemerkungen Platz finden. Es wurden die einzelnen Ringscheiben auf eine Glasmillimeterskala gelegt und nach zwei aufeinander senkrechten Richtungen die inneren und äusseren Durchmesser gemessen. Eine leichte Rechnung ergibt hieraus den Wert für den Leitradius. Aus den so für jeden einzelnen Ring erhaltenen Werten wurde dann ein für sämtliche Ringe geltender mittlerer Wert r errechnet. Zur Kontrolle führte ich die ganze Bestimmung regelmässig zwei Mal durch und erhielt, trotz der immerhin ziemlich rohen Methode, durchweg eine Übereinstimmung beider

Werte bis auf 0,02—0,03 mm, eine Differenz, die angesichts des ca. 6 cm betragenden Wertes für r verschwindend zu nennen ist.

Zur Berechnung der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$ in absolutem Masse führt die Beziehung:

$$(2) \qquad \mathfrak{B} = \frac{e}{q_1 \cdot \mathfrak{N} \cdot \beta} \cdot \Sigma\alpha - \frac{q_2}{q_1} \cdot \mathfrak{H}.$$

Hierin bedeuten:

β den durch Abziehen des Magnetinduktors hervorgerufenen Galvanometerausschlag in Skalenteilen,

e die diesem Ausschlage entsprechende induzierte elektromotorische Kraft in absolutem Masse (vgl. S. 14),

$\Sigma\alpha$ die algebraische Summe aller vorhergegangenen Ausschläge, welche durch Änderung des Magnetisierungsstromes hervorgerufen sind,

$\mathfrak{N}$ die Windungszahl der sekundären Spule,

q_1 den metallischen Ringquerschnitt und

q_2 den Querschnitt von etwa innerhalb der Sekundärspule sonst noch vorhandener nicht magnetisierbarer Substanz.

Die Bestimmung von q_1, über die ich im Folgenden einige Angaben machen will, geschieht im allgemeinen auf doppelte Weise, nämlich durch direkte Messung (geometrisch) und durch Wägung. Man führt beide Methoden durch und gewinnt so eine Kontrolle für die Richtigkeit des Resultates.

Einerseits mass ich also die Dicke der Einzelringe (mittels Dickenmessers); die Breite ergab sich als Nebenresultat bei der Bestimmung des Leitradius (vgl. S. 15). Der mittlere Querschnitt der einzelnen Ringe, der, wie ich glaubte, mit genügender Genauigkeit als rechteckig angesehen werden konnte, war dann gleich mittlerer Dicke × mittlerer Breite und der metallische Gesamtquerschnitt q_1 der aufeinander geschichteten Ringe ergab sich folglich durch Addition der erhaltenen Einzelwerte.

Andererseits ermittelte ich den Querschnitt q_1 aus Wägung, Leitradius und spezifischem Gewicht.

Nun zeigte sich aber bei sämtlichen 4 angefertigten Ringen, dass die beiden Werte für q_1 erheblich von einander abwichen, und zwar war der durch Wägung erhaltene durchweg um ca. 10% kleiner als der geometrisch gemessene. Eine Mittelbildung aus beiden war also von vornherein unzulässig. Übrigens ist der Grund der Differenz offenbar darin zu suchen, dass die Annahme eines rechteckigen Querschnittes für die Einzelringe (und somit die Rechnungsweise Dicke × Breite) nicht zutraf. Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass die Oberfläche der verwendeten Eisenbleche keine glatte ist, sondern vielfach kleine Rillen und Vertiefungen enthält, die in ihrer Gesamtheit sehr wohl mit zu der erwähnten Differenz beigetragen haben werden. Da überdies die Möglichkeit, auf andere Weise zum Ziel zu gelangen, nicht vorlag, so beschränkte ich mich auf die Methode der Wägung, welche auch im vorliegenden Falle genaue Werte zu liefern imstande ist, da einmal die Wägung und die Bestimmung des spezifischen Gewichts mit grosser Genauigkeit durchzuführen sind und der Wert für den Leitradius in keiner oder nur ganz verschwindender Weise von der angegebenen Fehlerhaftigkeit der Ringe betroffen wird. Letzteres erhellt schon aus der Seite 15 angeführten genauen Bestimmung von r und wird auch von einer Fehlerüberschlagsrechnung bestätigt.

Der zweite in (2) auf Seite 16 enthaltene Term liefert die Korrektion infolge des Interferrikumsquerschnitts q_2 und darf nicht vernachlässigt werden. q_2 konnte ich, wie schon Seite 10 angedeutet, nicht in exakter Weise, sondern nur angenähert bestimmen; doch dürfte die hierdurch im Zahlenwerte der Induktion $\mathfrak{B}$ hervorgerufene Ungenauigkeit im Höchstfalle wohl kaum 0,1% überschreiten.

Ich gehe nun dazu über,

5. Die Daten der Ringe

kurz in Tabellenform anzugeben.

Tabelle 1.

Ring aus	Fe[1])	0,61 Si	1,94 Si	4,55 Si
Zahl der einzelnen Ringe .	14	12	14	14
Masse in gr	63,16	57,82	64,18	61,32
Spezif. Gewicht	7,806	7,715	7,685	7,520
q_1 in cm²	$0{,}21_8$	$0{,}20_2$	$0{,}22_6$	$0{,}22_0$
q_2 in cm²	0,5	0,4	0,5	0,6
r in cm	5,92	5,90	5,88	5,89
N	461	452	452	463
$\mathfrak{N}$	581	571	587	589

III. Die Magnetisierungsversuche.

Bevor ich auf die einzelnen Ergebnisse näher eingehe, seien noch einige Bemerkungen über die Ausführung der Versuche vorausgeschickt.

Bei der Untersuchung der vorliegenden Materialien hatte ich Gelegenheit, den Einfluss kennen zu lernen, den besonders in schwachen Feldern die von G. Wiedemann[2]) entdeckte und von Tomlinson[3]) näher untersuchte „molekulare Akkommodation“ auf die Gestaltung der Hysteresisschleifen ausübt, und welche bewirkt, dass diese sich erst nach Vollendung mehrerer Kreisprozesse vollständig schliessen. Dieser Tatsache trug ich Rechnung, indem ich nach Vorgang von Rücker[4]) „in dem durch die Zeichen:

$$0 \rightarrow + \mathfrak{H}_{max} \rightarrow 0 \rightarrow - \mathfrak{H}_{max} \rightarrow 0 \rightarrow + \mathfrak{H}_{max} \rightarrow 0 \rightarrow - \mathfrak{H}_{max}$$

1) In dieser abgekürzten Weise werden künftig die Materialien meist bezeichnet werden.

2) G. Wiedemann. Die Lehre von der Elektrizität. 2. Aufl. 1895. 3. Bd. S. 491.

3) H. Tomlinson. Proc. Roy. Soc. London. 47, 13. 1889. Entnommen aus G. Wiedemann. l. c. S. 492.

4) l. c. S. 10.

angedeuteten Magnetisierungsprozesse zwar alle Ablesungen notierte, aber nur die auf den unterstrichenen Teil sich beziehenden verwertete". Um eine Anschauung von der Art der Verwendung des Beobachtungsmaterials zu geben, habe ich die Tabelle 2 hinzugefügt, welche für 4,55 Si bei $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 1,5 Gauss die sämtlichen Induktionswerte für 12, 6 und 1 Stufe angibt.

Ring 4,55 Si.

Tab. 2 (Anfang). $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 1,5.

Stufenzahl 12		Stufenzahl 6		Stufenzahl 1	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
— 1,512	— 3662	— 1,514	— 3704	— 1,513	— 3735
— 1,416	— 3631				
— 1,319	— 3592	— 1,321	— 3633		
— 1,215	— 3545				
— 1,107	— 3489	— 1,108	— 3527		
— 0,994	— 3422				
— 0,874	— 3345	— 0,876	— 3381		
— 0,747	— 3253				
— 0,613	— 3146	— 0,615	— 3181		
— 0,473	— 3019				
— 0,324	— 2866	— 0,325	— 2898		
— 0,168	— 2677				
0,000	— 2439	0,000	— 2468	0,000	— 2490
Kommutierung der Stromrichtung.					
+ 0,167	— 2144				
+ 0,322	— 1783	+ 0,322	— 1805		
+ 0,472	— 1303				
+ 0,610	— 517	+ 0,612	— 515		
+ 0,744	+ 630				
+ 0,869	+ 1520	+ 0,873	+ 1544		
+ 0,990	+ 2124				
+ 1,102	+ 2569	+ 1,104	+ 2597		
+ 1,211	+ 2917				
+ 1,316	+ 3201	+ 1,318	+ 3230		
+ 1,415	+ 3443				
+ 1,509	+ 3662	+ 1,514	+ 3703	+ 1,512	+ 3748
+ 1,415	+ 3630				
+ 1,316	+ 3589	+ 1,321	+ 3632		

Tab. 2 (Schluss).

Stufenzahl 12		Stufenzahl 6		Stufenzahl 1	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
+ 1,212	+ 3542				
+ 1,104	+ 3486	+ 1,108	+ 3528		
+ 0,994	+ 3419				
+ 0,873	+ 3342	+ 0,876	+ 3382		
+ 0,746	+ 3251				
+ 0,613	+ 3144	+ 0,614	+ 3182		
+ 0,472	+ 3018				
+ 0,322	+ 2866	+ 0,324	+ 2900		
+ 0,168	+ 2679				
0,000	+ 2443	0,000	+ 2472	0,000	+ 2490
Kommutierung der Stromrichtung.					
— 0,167	+ 2150				
— 0,321	+ 1793	— 0,322	+ 1814		
— 0,470	+ 1318				
— 0,608	+ 547	— 0,612	+ 545		
— 0,743	— 602				
— 0,869	— 1500	— 0,871	— 1527		
— 0,987	— 2115				
— 1,101	— 2563	— 1,104	— 2596		
— 1,209	— 2914				
— 1,314	— 3200	— 1,317	— 3239		
— 1,412	— 3443				
— 1,508	— 3660	— 1,512	— 3702	— 1,512	— 3748

Die vor jedem Versuche notwendige Entmagnetisierung erfolgte mittels Wechselstrom, den ich der grossen Dynamomaschine des Instituts entnahm. Meist konnte hierdurch ein nahezu vollständig unmagnetischer Zustand erreicht werden. Die infolge der noch verbleibenden geringfügigen Spuren von Magnetismus hervorgerufene Unsymmetrie der Hysteresisschleife inbezug auf die $\mathfrak{H}$-Achse wurde mittels einer einfachen Korrektionsrechnung beseitigt:

Von den drei aus der Beobachtung[1]) erhaltenen Werten der Maximalinduktion (2 negativen und 1 positiven) wird aus den beiden negativen das Mittel gebildet (falls sie nicht

1) Vergl. S. 18.

etwa identisch sind, was bei vollkommen geschlossener Hysteresisschleife eintritt) und dieses mit dem dritten positiven Werte kombiniert. Das so erhaltene Gesamtmittel — es heisse $\mathfrak{B}'_{max}$ — liefert dann den Massstab für die Korrektion der drei beobachteten Maximalinduktionen und aller dazwischenliegenden Beobachtungswerte.

1. Die Normalkurven.

Unter einer Normalkurve der Induktion ist diejenige Kurve zu verstehen, welche für ein gewisses Material die Induktion $\mathfrak{B}$ als eindeutige Funktion der Feldstärke $\mathfrak{H}$ darstellt (Fig. 2), wenn das Material in einer Form untersucht wird, welche Störungen infolge von Streuung ausschliesst. Es ist klar, dass diese Bedingung nur durch Anwendung geschlossener Toroide zu erfüllen ist, und weiterhin leuchtet ein, dass die hiermit erhaltene Induktionskurve zugleich für das betreffende Material charakteristisch sein wird.

Auch für die vorliegenden vier Eisensorten stellte ich zunächst diese Normalkurven auf, um einen allgemeinen Überblick über die magnetischen Verhältnisse zu erlangen und auf Grund der erhaltenen Ergebnisse die weiteren Anordnungen treffen zu können.

Zur Bestimmung der einzelnen Punkte, welche zur Konstruktion der Normalkurven nötig waren, bediente ich mich der Einstufenversuche, welche ganz nach der S. 18 angegebenen und in Tabelle 2 erläuterten Weise durchgeführt wurden, sodass also jeder Kurvenpunkt einem solchen Einstufenversuch entspricht. Als massgebender Wert für $\mathfrak{B}$ wurde natürlich der durch die wiederholte Mittelbildung (S. 21 oben) erhaltene angesehen. Gleichzeitig lieferten diese Versuche auch die Remanenz.

In den folgenden Tabellen 3—6 sind die Versuchsresultate für alle 4 Materialien verzeichnet. Die erste Kolumne gibt die Feldstärke $\mathfrak{H}$, die zweite das zugehörige $\mathfrak{B}$, die dritte die aus beiden berechnete Permeabilität $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$.

Hieran anschliessend bemerke ich noch ganz allgemein: Meist gelang es, die Beobachtungen bei völlig konstanter Strom- und also Feldstärke durchzuführen. Traten aber doch kleine Änderungen (besonders bei langdauernden Versuchen) ein, dann wurde eine der früher bei $\mathfrak{B}_{max}$ angewandten analoge Mittelbildung aus den einzelnen $\mathfrak{H}_{max}$ vorgenommen und die Berechnung der Permeabilität μ auf dieses errechnete $\mathfrak{H}_{max}$ bezogen.

Tab. 3. Fe

$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{B}_{rem}$	% Rem
0,30	84,38	282,2	17,11	20,3
0,99	623,9	629	281,1	45,0
1,48	1593	1076	978,6	61,4
2,0	2964	1486	2082	70,2
2,8	4798	1731	3576	74,5
3,5	6178	1746	4654	75,3
4,9	8107	1638	6017	74,2
10,0	11765	1175	7898	67,1
20,3	14790	731	8657	58,5
34,3	16310	476	8786	53,9
56,1	17170	306	8790	51,2

Tab. 4. 0,61 Si

$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{B}_{rem}$	% Rem
0,29	84,23	287,8	25,39	30,2
0,80	640,9	801	335	52,3
1,27	1801	1420	1179	65,4
1,6	2776	1731	1917	69,1
2,0	3693	1864	2598	70,4
2,6	4897	1872	3458	70,6
3,5	6048	1746	4182	69,1
6,1	8492	1398	5390	63,5
10,0	10800	1078	6161	57,0
23,6	13900	589	6573	47,5
34,9	15120	433	6671	44,1
55,5	16060	290	6617	41,2

Tab. 5. 1,94 Si

$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{B}_{rem}$	% Rem
0,70	587,2	838	260	44,3
1,01	1266	1257	716	56,6
1,39	2267	1614	1446	64,6
1,75	3131	1788	2060	65,8
3,1	5396	1758	3577	66,3
4,6	7032	1534	4428	62,9
10,0	10185	1023	5457	53,6
20,3	12950	638	5872	45,3
34,3	14740	430	6051	41,1
54,9	15830	288	6084	38,4

Tab. 6. 4,55 Si

$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{B}_{rem}$	% Rem
0,30	225,8	748	56,89	25,2
0,50	518,1	1046	181,9	35,1
0,72	1124	1566	558	49,6
0,90	1772	1967	1012	57,1
1,2	2856	2384	1837	64,3
1,5	3745	2476	2497	66,7
2,0	4861	2437	3290	67,7
2,8	6198	2204	4126	66,6
4,8	8122	1694	5023	61,8
10,0	10887	1088	5754	52,9
20,3	12930	637	5875	45,5
35,4	14290	404	5883	41,2
55,3	15260	276	5886	38,6

Betrachten wir nun die nach vorstehenden Tabellenwerten in Fig. 2 gezeichneten normalen $\mathfrak{B}$—$\mathfrak{H}$- und μ—$\mathfrak{B}$-kurven, so zeigt sich, dass in schwachen Feldern die legierten Bleche eine weit höhere Induktion und Permeabilität besitzen als das gewöhnliche Eisenblech. Die Anordnung der Kurven ist dabei vollkommen dem Prozentgehalte an Silizium entsprechend. Genau das Analoge, nur in umgekehrter Reihenfolge, finden wir bei höheren Feldstärken. Hier

bleiben also die Legierungen in ihren magnetischen Eigenschaften hinter dem Eisen zurück; doch beträgt beispielsweise bei $\mathfrak{H}$ = ca. 55 Gauss die Permeabilität von 4,55 Si immer noch rund 90% von der des Fe, die Abnahme ist demnach keine allzu beträchtliche. Eine Gesetzmässigkeit in der Durchkreuzung der Kurven ist nicht festzustellen. Die Legierung 1,94 Si (besonders gut aus der Permeabilitätskurve ersichtlich) zeigt ein abweichendes Verhalten insofern, als der Wert ihrer maximalen Permeabilität nicht zwischen denen von 0,61 Si und 4,55 Si liegt, wie man wohl erwarten sollte, sondern noch unter dem von 0,61 Si; im übrigen ordnet sie sich, namentlich an den Enden der Kurven, gut in die Reihe der anderen ein. Die Abweichung dürfte aber nicht eine prinzipielle Bedeutung beanspruchen, sondern ihren Grund in einer durch äussere Einflüsse unkontrollierbarer Natur verursachten Veränderung[1]) des Materials haben.

Als beachtenswert verdient aber Folgendes noch hervorgehoben zu werden: Die Werte des Permeabilitätsmaximums, welche für

Fe	ca.	1750
0,61 Si	„	1900
4,55 Si	„	2500

betragen, erscheinen ungewöhnlich klein im Vergleich zu den sonst in der Literatur meist angegebenen Werten. So erhielten Barrett, Brown und Hadfield[2]) für ein Material mit

0,07% Si	für $\mathfrak{H}$ = 2,96	μ = 2770
5,5	2,66	3960,

ferner Baker[3])

0,024	2	2500
1,026	2	2750
2,9	2	3250.

1) Vergl. S. 36 Anm. 2.

2) Nach der von Gumlich ausgeführten Korrektion; vergl. E. T. Z. 23. 1902. S. 101.

3) l. c.

Diese Versuche bezogen sich, wie schon erwähnt, auf Stäbe; die neuesten Untersuchungen an frisch geglühten Blechen geben zum Teil noch bedeutend höhere Werte, wobei dann allerdings noch die bisher besonders bei gewöhnlichem Eisenblech beobachteten Alterungserscheinungen[1]) zu berücksichtigen sind.

Für die Erklärung der Abweichung meiner Werte können natürlich Beobachtungsfehler irgend welcher Art nicht in Frage kommen; überdies zeigen ja sämtliche Kurven der Figur 2 einen durchaus glatten Verlauf, wobei noch bemerkt sei, dass die für die höchsten verwendeten Feldstärken (ca. 55 Gauss) erhaltenen Maximalinduktionen in der Tat die üblichen Beträge aufweisen. Die vorhandenen Differenzen beziehen sich in der Hauptsache also nur auf die steile Region der normalen Induktionskurven, in welcher bekanntlich die Permeabilität ihr Maximum erreicht. Weiter: da die in Rede stehende Abweichung durchgehends bei allen 4 Proben auftritt, da ich ferner für die durch den verschiedenen Siliziumgehalt bedingten verschieden hohen μ_{max}-Werte ein ähnliches gegenseitiges Zahlenverhältnis[2]) finde, wie es die Angaben von Barrett, Brown und Hadfield, sowie auch die von Baker erkennen lassen, so bleibt nichts anderes übrig, als einen für alle vier Materialien in gleicher Weise geltenden, sich auf die Beschaffenheit des Materials selbst beziehenden Grund zu suchen. Auf diesen komme ich an späterer Stelle[3]) zu sprechen.

Dass hiervon alle relativen Ergebnisse, der Hauptzweck vorliegender Arbeit, gänzlich unberührt bleiben, wird durch die vorstehenden Auseinandersetzungen genügend begründet; schon die Normalkurven beweisen es.

Einige andere Resultate mögen nunmehr noch hervorgehoben werden. Die Absolutbeträge der Remanenz,[4])

1) Vergl. E. Gumlich und E. Vollhardt. E. T. Z. 29. 1908. S. 903.
2) abgesehen von 1,94 Si.
3) S. 35 f.
4) In den Tabellen 3–6 unter „$\mathfrak{B}_{rem}$“.

wie sie aus den Einstufenversuchen folgen, wurden in gleicher Weise wie die Maximalinduktionen in Abhängigkeit von der Feldstärke graphisch dargestellt und ergeben zusammen die Kurven der Figur 3. Letztere verlaufen den $\mathfrak{B}_{max}$-Kurven vollkommen korrespondierend.

Ferner bestimmte ich die Remanenz in Prozenten der Maximalinduktion[1]) und unterwarf die erhaltenen Zahlen ebenfalls der graphischen Darstellung, indem ich sie in Beziehung zur Feldstärke setzte (Figur 4). Aus den Kurven ergibt sich, dass in Feldern bis zu etwa 2 Gauss der Prozentbetrag der Remanenz für die Legierungen ein bedeutend höherer ist als für Eisen ohne Silizium, während späterhin das Umgekehrte statthat, wobei man noch bemerken kann, dass auch die Maximalbeträge für die Legierungen den des Eisens nicht erreichen. Dass übrigens auch letzterer den ziemlich geringen Wert von 75 % besitzt, wird später in anderem Zusammenhange[2]) nochmals Erwähnung finden. Ausgeprägt ist eigentlich nur der Unterschied des Eisens gegen die Gesamtheit der Legierungen, während diese in schwachen Feldern wenigstens sich untereinander ziemlich unregelmässig verhalten, wenn auch der Verlauf der einzelnen Kurven im allgemeinen recht glatt zu nennen ist.

2. Einfluss verschiedener Stufenzahlen auf die Maximalinduktion.

Nachdem ich mir so einen allgemeinen Überblick über die in den Materialien herrschenden magnetischen Verhältnisse verschafft hatte, ging ich nunmehr an diejenigen Untersuchungen, die den Einfluss der Stufenzahl auf die Maximalinduktion klarlegen sollten. Als leitenden Gesichtspunkt hierfür benutzte ich zunächst das von Rücker[3]) erhaltene Resultat, nach welchem sich besonders bei hohen Werten der Permeabilität ein merklicher Einfluss der Stufenzahl geltend macht,

1) In den Tabellen 3—6 unter „% Rem“.
2) S. 35.
3) l. c.

und traf sodann an der Hand meiner normalen Permeabilitätskurven (Fig. 2) eine zweckentsprechende Auswahl der anzuwendenden Maximalfeldstärken. Die folgenden Tabellen 7 bis 23 geben nun die Endwerte aus diesen Untersuchungen für Fe, 0,61 Si und 4,55 Si. Dazu sei kurz noch bemerkt: In den Spalten unter $\mathfrak{H}_{max}$ und $\mathfrak{B}'_{max}$ sind die nach dem Verfahren der wiederholten Mittelbildung[1]) erhaltenen Werte eingetragen. Es ist nun aber nicht zulässig, das bei irgend einer Stufenzahl resultierende $\mathfrak{B}'_{max}$ direkt in Beziehung zu setzen mit dem bei annähernd gleichem $\mathfrak{H}_{max}$, aber anderer Stufenzahl, sich ergebenden; denn gewöhnlich weichen die Werte für $\mathfrak{H}_{max}$ — wenn auch nur wenig — von einander ab. Es ist demnach eine Korrektionsrechnung erforderlich; sie beruht darauf, zunächst aus allen $\mathfrak{H}_{max}$ ein „mittleres $\mathfrak{H}_{max}$" zu bestimmen, worauf dieses sowie die aus jeder einzelnen Stufenreihe resultierende Permeabilität μ aufgrund der Beziehung $\mathfrak{B} = \mu\,\mathfrak{H}$ das auf die mittlere Feldstärke „reduzierte $\mathfrak{B}_{max}$" liefern, vorausgesetzt, dass die Permeabilität bei den geringfügigen Differenzen zwischen der tatsächlichen und der mittleren Feldstärke merklich konstant bleibt, dass also gilt:

$$\frac{\mathfrak{B}'_{max}}{\mathfrak{H}_{max}} = \mu = \frac{\text{reduziertes } \mathfrak{B}_{max}}{\text{mittleres } \mathfrak{H}_{max}}.$$

Fe.

Tab. 7. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 0,3.

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduz. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.[2])
12	0,3014	77,31	256,5	0,3002	77,01	— 9,1
6	0,2998	79,66	265,7		79,76	— 5,8
3	0,3006	82,03	272,9		81,92	— 3,3
1	0,2990	84,38	282,2		84,71	—

1) Vergl. S. 21.

2) Unter der Spalte „% Diff." sind die prozentualen Unterschiede verzeichnet, um welche das betreffende $\mathfrak{B}_{max}$ grösser (+) oder kleiner (—) ist als das $\mathfrak{B}_{max_1}$.

Tab. 8. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 1,5.

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduz. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
6	1,483	1522	1026	1,4823	1521	— 4,6
3	1,483	1570	1058		1569	— 1,6
1	1,481	1593	1076		1595	—

Tab. 9. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 2,0.

24	2,006	2706	1349	1,9954	2692	— 9,2
12	1,996	2825	1412		2825	— 4,7
6	1,984	2848	1436		2865	— 3,4
3	1,996	2904	1456		2904	— 2,0
1	1,995	2964	1486		2965	—

Tab. 10. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 2,8.

12	2,747	4581	1668	2,7585	4600	— 3,6
6	2,763	4690	1697		4682	— 1,9
3	2,752	4649	1689		4660	— 2,4
1	2,772	4798	1731		4774	—

Tab. 11. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 10,0.

12	10,016	11558	1154	10,013	11554	— 1,8
6	10,017	11680	1166		11675	— 0,8
3	10,007	11730	1172		11737	— 0,2
1	10,013	11765	1175		11765	—

Tab. 12. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 56.

24	55,60	17101	307,6	55,79	17160	+ 0,4
12	55,60	17272	310,6		17331	+ 1,4
6	55,76	17064	306,1		17075	— 0,1
3	55,91	17315	309,7		17278	+ 1,1
1	56,07	17174	306,3		17089	—

0,61 Si.

Tab. 13. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 0,3.

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduz. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
12	0,2940	82,49	280,6	0,2929	82,17	— 2,5
3	0,2920	83,38	285,5		83,63	— 0,8
1	0,2927	84,23	287,8		84,30	—

Tab. 14. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 0,8.

6	0,8023	625,7	780	0,8011	624,8	— 2,7
1	0,7998	640,9	801		641,9	—

Tab. 15. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 1,3.

24	1,264	1645	1301	1,2658	1647	— 8,4
12	1,264	1720	1361		1722	— 4,2
6	1,266	1768	1397		1768	— 1,7
3	1,267	1771	1397		1769	— 1,6
1	1,268	1801	1420		1798	—

Tab. 16. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 2,0.

24	1,978	3496	1767	1,9778	3495	— 5,2
12	1,974	3574	1811		3582	— 2,8
6	1,975	3632	1839		3637	— 1,3
3	1,981	3652	1843		3646	— 1,1
1	1,981	3693	1864		3687	—

Tab. 17. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 10,0.

24	10,008	10522	1051	10,037	10553	— 2,4
12	10,057	10772	1071		10750	— 0,6
6	10,047	10818	1077		10807	— 0,1
3	10,047	10846	1080		10835	+ 0,2
1	10,027	10802	1078		10816	—

Tab. 18. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 55.

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduz. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
24	54,90	16100	293,3		16191	+ 1,3
12	55,28	16293	294,7		16272	+ 1,8
6	55,26	16232	293,7	55,21	16217	+ 1,4
3	55,16	16025	290,5		16040	+ 0,3
1	55,47	16062	289,6		15988	—

4,55 Si.

Tab. 19. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 0,5.

6	0,5015	519,3	1036		517,3	— 0,4
3	0,4988	519,2	1041	0,4996	520,0	+ 0,0
1	0'4984	518,5	1040		519,8	—

Tab. 20. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 0,9.

12	0,9040	1752	1938		1747	— 1,5
6	0,9008	1773	1968	0,9015	1774	+ 0,0
3	0,9002	1751	1946		1754	— 1,1
1	0,9008	1772	1967		1774	—

Tab. 21. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 1,5.

12	1,509	3662	2426		3670	— 2,0
6	1,514	3703	2447	1,5128	3701	— 1,2
3	1,516	3731	2461		3723	— 0,6
1	1,512	3745	2476		3746	—

Tab. 22. $\mathfrak{H}_{max} =$ ca. 10,0.

12	10,001	10820	1082		10822	— 0,5
6	9,995	10883	1089	10,002	10891	+ 0,1
3	10,003	10827	1082		10826	— 0,5
1	10,009	10887	1088		10879	—

Tab. 23. $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 55.

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduz. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
12	55,47	15400	277,7	55,33	15362	+ 0,7
6	55,18	15350	278,2		15391	+ 0,9
1	55,34	15256	275,7		15254	—

Zwecks besserer Veranschaulichung der hier mitgeteilten Ergebnisse habe ich die prozentualen Unterschiede gegenüber dem bei den Einstufenversuchen erhaltenen $\mathfrak{B}_{max_1}$ nochmals besonders in den folgenden Tabellen zusammengestellt.

% Differenz gegen $\mathfrak{B}_{max_1}$.

Tab. 24. Fe.

	Feldstärke $\mathfrak{H}_{max}$					
Stufen	0,3	1,5	2,0	2,8	10,0	56
3	— 3,3	— 1,6	— 2,0	— 2,4	— 0,2	+ 1,1
6	— 5,8	— 4,6	— 3,4	— 1,9	— 0,8	— 0,1
12	— 9,1		— 4,7	— 3,6	— 1,8	+ 1,4
24			— 9,2			+ 0,4

Tab. 25. 0,61 Si.

	Feldstärke $\mathfrak{H}_{max}$					
Stufen	0,3	0,8	1,3	2,0	10,0	55
3	— 0,8		— 1,6	— 1,1	+ 0,2	+ 0,3
6		— 2,7	— 1,7	— 1,3	— 0,1	+ 1,4
12	— 2,5		— 4,2	— 2,8	— 0,6	+ 1,8
24			— 8,4	— 5,2	— 2,4	+ 1,3

Tab. 26. 4,55 Si.

	Feldstärke $\mathfrak{H}_{max}$				
Stufen	0,5	0,9	1,5	10,0	55
3	+ 0,0	— 1,1	— 0,6	— 0,5	
6	— 0,4	+ 0,0	— 1,2	+ 0,1	+ 0,9
12		— 1,5	— 2,0	— 0,5	+ 0,7

Hiernach lässt sich nun, im Gegensatz zu dem Hauptergebnis von Rücker,[1]) irgend eine bei allen 3 Proben durchgängig auftretende Gesetzmässigkeit des Einflusses der Stufenzahl gegenüber der Permeabilität nicht konstatieren. Die Verhältnisse liegen vielmehr so, dass tatsächlich zwar bei 4,55 Si das Maximum der Abhängigkeit etwa mit dem für $\mathfrak{H}_{max} = 1{,}5$ erscheinenden Permeabilitätsmaximum zusammenfällt, dass aber mit abnehmendem Siliziumgehalt eine Verschiebung des Abhängigkeitsmaximums nach niedrigeren Feldstärken hin eintritt. Diese ist so auffallend, dass bei Fe sogar bis zu einer Feldstärke von 0,3 Gauss hinunter ein dauerndes Anwachsen der Abhängigkeit von der Stufenzahl gefunden wurde, wogegen die beiden Legierungen 0,61 Si und 4,55 Si eine deutliche Verringerung der Abhängigkeit mit abnehmenden Feldstärken aufweisen. Es ist aber anzunehmen, dass auch bei Fe in genügend niedrigen Feldern der Einfluss der Stufenzahl ein bedeutend geringerer werden wird. Mit steigenden Feldstärken nimmt dagegen die Abhängigkeit jenseits ihres Maximums bei allen Proben in regelmässiger Weise ab.

Ferner erfährt der Maximalbetrag der prozentualen Differenz durch Anwesenheit von Silizium eine sehr erhebliche Erniedrigung; gleichzeitig sieht man, dass das Gebiet der Feldstärken, für welche die Abhängigkeit wirksam ist, bedeutend eingeengt wird, wobei hier sowohl wie in der vorhin behandelten Erscheinung die Legierung 0,61 Si stets eine mittlere Stellung zwischen Fe und 4,55 Si, aber mehr nach Fe hinneigend, einnimmt, also angenähert eine Proportionalität mit dem Siliziumgehalte offenbar wird.

Ganz aus dem Rahmen der hier gefundenen Gesetzmässigkeit herausfallend ist das Verhalten sämtlicher drei Proben in stärkeren Feldern (ca. 55 Gauss). Hier sind fast durchgängig die Werte von $\mathfrak{B}_{max_1}$ kleiner als die Maximalinduktionen bei den mehrstufigen Versuchsreihen. Der Unterschied ist nicht gross, er erreicht höchstens 1,8% und bleibt

1) Vergl. S. 26.

in ebenso viel Fällen unter 1%, als er darüber hinausgeht. Es ist weder eine Abhängigkeit von der Stufenzahl innerhalb desselben Ringes noch von den einzelnen Materialien festzustellen. Übrigens hat auch Rücker[1]) Ähnliches beobachtet.

3. Einfluss des Siliziums auf Koerzitivkraft und Hysteresisverlust.

Die im vorigen Abschnitte behandelten Magnetisierungsversuche lieferten nun auch das Mittel, um den Einfluss des Siliziums auf die Grösse der Koerzitivkraft und den Energieverlust durch Hysteresis zu bestimmen. Diese beiden Begriffe hängen insofern eng zusammen, als ja die Koerzitivkraft angenähert als Massstab für die beim Ummagnetisieren aufgewendete Energie benutzt werden kann, und man wird gegebenenfalls entsprechende Schlüsse ziehen dürfen.

Die hier vorliegenden Verhältnisse mögen an der Hand der beigegebenen Zeichnungen für die Hysteresisschleifen (Fig. 5—9) erläutert werden. Verglichen wurden immer Versuche, die an den verschiedenen Materialien bei nahe gleicher Feldstärke und gleicher Stufenzahl vorgenommen waren. Dabei ist indes Folgendes noch zu beachten: Ein Vergleich inbezug auf die Energievergeudung wird nur dann zulässig und im Hinblick auf praktische Verwertbarkeit in der Technik von massgebender Bedeutung sein, wenn die Probestücke bei möglichst gleichen Induktionswerten zu einander in Beziehung gesetzt werden; denn beispielsweise beim Bau von Dynamomaschinen werden gewisse Werte von $\mathfrak{B}$ vorgegeben, auf Grund deren die Berechnung der Dimensionen für die zu bauende Maschine erfolgt. In diesem Sinne direkt brauchbar sind also nur die Figuren 8 und 9, denn hier sind die Differenzen in den von den verschiedenen Eisensorten für die gleiche Feldstärke erreichten Maximalinduktionen keine allzu grossen.

---

1) l c. S. 51 f.

Als Ergebnis folgt, dass die Koerzitivkraft sowohl wie die ganze durch den Flächeninhalt der Hysteresisschleife gegebene Ummagnetisierungsarbeit durch Anwesenheit von Silizium wesentlich abnehmen. Meine Beobachtungen bestätigen demnach die sonst bereits bekannten Tatsachen auch für die hier verwendeten Bleche. In niederen Feldern lassen die für gleiches $\mathfrak{H}_{max}$ erhaltenen Hysteresisschleifen nicht ohne Weiteres einen Vergleich zu; die Legierungen nämlich erreichen weit höhere[1]) Maximalinduktionen als das Eisen und weisen im Zusammenhange damit auch grössere Hysteresis auf, Beispiel Fig. 6 und 7a und b. Hingegen nimmt die Koerzitivkraft auch hier in Übereinstimmung mit den oben genannten Fällen (Fig. 8 und 9) mit wachsendem Siliziumgehalte ab, wie aus den Zeichnungen deutlich hervorgeht, und weist somit auf eine Verringerung des — um mich so auszudrücken — „spezifischen" Hysteresisverlustes hin. Dies folgt dann tatsächlich auch aus dem Flächeninhalte der Schleifen selbst, wenn man auf die Gleichheit der angewendeten $\mathfrak{H}_{max}$ verzichtet und, wie oben schon ausgeführt, Kreisprozesse von gleicher Maximalinduktion zu einander in Beziehung setzt. Als Beispiel hierfür mögen dienen die Figuren 7b und c. Eine Abweichung von den bisherigen Resultaten ist aus Fig. 5 ersichtlich, welche die Hysteresisschleifen von Fe und 0,61 Si bei einer Maximalfeldstärke von 0,3 Gauss zeigt. Hier ist eine nicht unbeträchtliche Zunahme der Koerzitivkraft mit steigendem Siliziumgehalt wahrzunehmen. Auch die ganzen Flächeninhalte der Schleifen können wegen des nur um ca. 6% verschiedenen $\mathfrak{B}_{max}$ direkt verglichen werden und lassen ebenfalls erkennen, dass der Energieverlust für 0,61 Si ein grösserer ist als für Fe. 4,55 Si lässt in diesem Falle betreffs der Hysteresisschleife mit 0,61 Si und Fe keinen direkten Vergleich zu wegen seiner bedeutend höheren Maximalinduktion, doch ist die Koerzitivkraft nahezu dieselbe wie für 0,61 Si, jedenfalls grösser als für Fe. Praktische Bedeutung kommt

1) siehe die Normalkurven.

aber diesem letzten Resultate nicht zu, da ja in der Technik mit ganz wesentlich höheren Induktionen gearbeitet wird, als hier verglichen wurden.

Für Kreisprozesse zwischen hohen Werten der Induktion nähert sich die Koerzitivkraft (ebenso wie die Remanenz) mit steigendem $\mathfrak{B}_{max}$ einem Grenzwerte und kann unter diesen Umständen als eine Materialkonstante angesehen werden. Die gewöhnlich für ausgeglühtes Eisenblech angegebenen Werte liegen um 1 [C. G. S.] herum, bei legierten Blechen entsprechend niedriger.

Die aus Fig. 9 entnommenen also auch für Induktionen aus der Sättigungsregion geltenden Werte betragen dagegen:

bei	Fe	3,1,
	0,61 Si	2,7,
	4,55 Si	1,7,

sind also erheblich grösser. Diese Erscheinung weist nun in Übereinstimmung mit den früher gegenüber anderen Untersuchungen zu niedrig gefundenen Werten für μ_{max}[1]) und den ebenfalls verhältnismässig niedrigen Maximalwerten der prozentualen Remanenz[2]) auf eine auffallende magnetische Härte sämtlicher Materialien hin. Es ist hier der Ort, dies nunmehr etwas näher zu diskutieren.

Von E. Gumlich und E. Vollhardt[3]) ausgeführte Versuche haben dargelegt, dass das blosse Herausschneiden schmaler Probestreifen aus den Blechtafeln infolge einer dabei eintretenden Änderung in der molekularen Struktur unter allen Umständen eine beträchtliche Härtung verursacht, welche umso stärker wird, je schmaler die verwendeten Blechstreifen sind. Diese Härtung äussert sich in einer bedeutenden Zunahme der Koerzitivkraft. Auch der ganze Verlauf der Magnetisierungskurve erfährt eine Veränderung. Es ergab sich dies aus Versuchen mit einem aus einzelnen Blechringen zusammengesetzten Ringe, der in

1) Vergl. S. 24.
2) Vergl. S. 26.
3) E. T. Z. 1908. 29. S. 903.

drei konzentrische von $^1/_3$ der ursprünglichen Breite zerlegt wurde. Dabei erfuhr ebenfalls die Koerzitivkraft eine Vergrösserung, Remanenz und besonders Permeabilität nahmen ab.

Es ist nicht zu zweifeln, dass die von mir beobachtete Härte des Materials zu einem sehr grossen Teile auf die soeben erörterten Umstände zurückzuführen ist, betrug doch die Breite meiner Ringe nur 0,5 cm.[1]) Ob und inwieweit ausserdem noch andere Gründe[2]) (beispielsweise eine ungeeignete thermische Behandlung der Bleche nach Ausführung des Walzprozesses oder die Anwesenheit anderer Substanzen) wirksam gewesen sind, lässt sich nicht entscheiden.

Es sei aber im Anschluss hieran und mit Beziehung auf die schon Seite 25 unternommenen Begründungen nochmals ausdrücklich betont, dass meine sämtlichen Ergebnisse wegen ihres relativen Charakters von der bei allen Materialien gefundenen abnormen magnetischen Härte nicht berührt werden können.

IV. Untersuchungen über die magnetische Nachwirkung.

Unter der magnetischen Nachwirkung, auch Viskosität genannt, versteht man die Erscheinung, dass der magnetische Zustand der ihn hervorrufenden Kraft nicht momentan folgt, sondern eine gewisse merkliche Zeit dazu braucht. Die Kenntnis ihrer Gesetze ist in mancher Beziehung noch unsicher; es sei nur daran erinnert, dass z. B. nach

1) Von der Abhandlung von Gumlich und Vollhardt erhielt ich erst nach Abschluss meiner Arbeit Kenntnis.

2) Solche werden auch für die früher bei Aufstellung der Normalkurven beobachtete Abweichung von 1,94 Si in Betracht kommen.

R. Jouaust,[1]) D. Mazotto,[2]) F. Rücker[3]) die magnetische Nachwirkung am stärksten bei hohen Werten der Permeabilität auftritt, während M. Wien[4]) direkt das Gegenteil gefunden hat.

Die Messung der magnetischen Nachwirkung beim ballistischen Verfahren läuft im Prinzip darauf hinaus, den Sekundärkreis im Momente der Stromschliessung offen zu halten und erst eine gewisse Zeit nach Variation des Magnetisierungsstromes zu schliessen, worauf dann etwa noch erfolgende Änderungen im magnetischen Zustande des Ringes einen Induktionsstrom hervorrufen, der am Galvanometer verfolgt werden kann.

Da von vornherein beabsichtigt war, die Nachwirkungserscheinungen besonders unter Berücksichtigung sehr kleiner Zeitdifferenzen zu studieren, bediente ich mich einer im hiesigen Institut von R. Reinicke[5]) bereits mit Erfolg verwendeten Anordnung, welche die bekannte Atwood'sche Fallmaschine mit zweckentsprechenden Abänderungen benutzt.

»Das aus einer gewissen durch Ausprobieren festgestellten Höhe fallende Gewicht schloss zuerst vermittelst eines starken als Übergewicht dienenden Bügels den Primärkreis, lief nach Abheben desselben mit gleichförmiger Geschwindigkeit weiter und schloss nach beliebiger Zeit durch einen zweiten kürzeren aufliegenden Bügel den Sekundärkreis. Praktisch geschah das in der Weise, dass die Leitungsdrähte zu Quecksilberrinnen geführt wurden, die in Form von Kreisringsektoren (um bei fallendem Gewicht eventuellen leicht eintretenden Verdrehungen der Schnur und damit der aufliegenden Bügel zu begegnen) in zwei in der Mitte kreisförmig ausgeschnittenen Paraffinplatten eingegraben waren.

1) Comptes Rendus 1904. 139. S. 272.

2) Nuov. Cim. 11. 1900. S. 81; entnommen aus den Beibl. zu Drud. Ann. Bd. 24. 1900. S. 1166.

3) l. c. S. 93.

4) Wied. Ann. 66. 1898. S. 888.

5) l. c. S. 40. Die folgende Beschreibung ist direkt hieraus entnommen.

Der kürzere Sekundärbügel (zwecks Herstellung einer gleichförmigen Bewegung natürlich auf der anderen Seite des Fadens äquilibriert) ging durch den oberen grösseren Ausschnitt unbehindert hindurch und lief weiter bis zum Einschlagen in die unteren Quecksilberrinnen. Das eigentliche Fallgewicht setzte seinen Weg durch den kleineren unteren Ausschnitt fort und wurde schliesslich festgehalten. Die durchweg verwendete gleichförmige Geschwindigkeit betrug 80 cm pro Sekunde, sodass zum Zurücklegen von 1 cm Weg 0,0125 sec. erforderlich waren. Zeitdifferenzen von ganzen Sekunden wurden nicht mit dieser Vorrichtung gemessen, sondern das Eintauchen des Primär- und Sekundärbügels geschah nach dem Takte eines Halbsekundenpendels. Die hierbei notwendig eintretende kleine Ungenauigkeit in der Zeitbestimmung ist aber ohne Bedeutung.

Besondere Sorgfalt musste der Elimination von Thermoströmen, deren Auftreten die freiliegenden Kontakte der Fallvorrichtung begünstigten, gewidmet werden. Durch Abstellen der Heizung und Verwendung von Kerzen- statt Gasbeleuchtung wurde daher für eine möglichst konstante Temperatur gesorgt.

Da die beschriebene Vorrichtung nur die durch Schluss (nicht durch Öffnung) des Primärstromes hervorgerufenen Nachwirkungserscheinungen zu messen erlaubt, begnügte ich mich mit diesen, wie ja überhaupt nur eine Feststellung ihrer hauptsächlichsten Eigenschaften ins Auge gefasst war. Nach voraufgegangener Entmagnetisierung liess ich den Ring bei der beabsichtigten Feldstärke mehrere vollständige einstufige Kreisprozesse (in Berücksichtigung der molekularen Akkommodation) durchlaufen und führte erst dann immer an derselben Stelle des Cyklus die Nachwirkungsbeobachtung aus. Unmittelbar vor dieser wurde der Sekundärbügel bei noch geöffnetem Primärkreise eingetaucht und der so für sich bestimmte Thermostrom nachher von der eigentlichen Nachwirkungsbeobachtung in Abzug gebracht.

Nach diesem Verfahren habe ich die drei Ringe von Fe, 0,61 Si und 4,55 Si bei je drei verschiedenen Feldstärken untersucht. Für die Wahl der letzteren war der Verlauf der Permeabilität massgebend, indem ich nämlich einmal nach Fig. 2 das dem μ_{max} entsprechende Feld[1]) und ausserdem noch sowohl ein schwächeres wie ein stärkeres wählte. Dadurch hoffte ich eine eventuelle Beziehung der Nachwirkung zur Permeabilität ermitteln zu können. Im Folgenden sind die Zeitdifferenzen sowie die zugehörigen Ausschläge in Skalenteilen (mm) tabellarisch zusammengestellt. Die Ausschläge über 500 Skalenteile wurden erhalten durch Reduktion[2]) der bei herabgesetzter Empfindlichkeit beobachteten auf solche bei unverminderter Empfindlichkeit.

Tab. 27. Fe.

Zeit in Sekunden	Feldstärke $\mathfrak{H}$		
	0,3	2,0	10
0,0000	148,4	6920	26700
0,0250	6,0	326,8	14,0
0,0375	—	182,0	5,0
0,0500	2,5	64,6	—
0,0625	1,7	28,9	—
0,0750	—	19,0	4.2
0,0875	0,3	13,8	—
0,1000		9,7	—
0,1250		7,4	4,2
0,1875		5,5	—
0,250		5,3	3,6
0,375		—	3,4
0,5		3,7	2,4
1,0		2,5	1,7
2,0		1,2	—
5,0		0,5	0,4

1) Abgesehen vom Eisenring.
2) Vgl. S. 14.

Tab. 28. 4,55 Si.

Zeit in Sekunden	Feldstärke $\mathfrak{H}$ 0,5	1,5	10
0,0000	996	9070	24070
0,0375	3,3	615	— 0,3
0,0500	2,8	208,0	
0,0625	—	98,8	
0,0875	—	15,3	
0,1000	1,1	—	
0,1125	0,8	8,0	
0,1250	—	—	
0,1375	—	3,8	
0,1625	—	0,9	
0,1875	—		
0,2500	— 0,2		

Tab. 29. 0,61 Si.

Zeit in Sekunden	Feldstärke $\mathfrak{H}$ 1,3	2,0	10
0,0000	3150	6300	17720
0,0250	639	1556	5,8
0,0375	389,1	715	—
0,0500	128,3	388,6	3,7
0,0625	69,3	188,4	—
0,0750	31,2	72,7	3,1
0,0875	17,6	36,1	—
0,1000	8,9	15,6	—
0,1125	—	11,9	—
0,1250	—	10,5	—
0,1500	—	—	1,4
0,1875	3,4	5,4	0,6
0,250	—	3,7	
0,375	1,7	2,5	
0,5	1,5	2,0	
1,0		1,4	

Zunächst lässt sich, im Hinblick auf die eingangs dieses Kapitels erwähnte Divergenz der Resultate von Jouaust, Mazotto, Rücker einerseits und M. Wien andererseits, deutlich erkennen, dass bei allen drei Ringen die Nachwirkung, sowohl absolut wie relativ genommen, ihren grössten Betrag bei hohen Werten der Permeabilität erreicht. Die nach den Beobachtungen gezeichneten Kurven charakterisieren sich sämtlich durch einen sehr plötzlichen Abfall, dem bei Fe und 0,61 Si unvermittelt ein ziemlich langsames Abklingen folgt.[1]) Zugleich treten die durch den Siliziumgehalt bedingten Unterschiede markant hervor: So ist für 4,55 Si bei $\mathfrak{H} = 1{,}5$ die Nachwirkung schon nach 0,1625 sec. auf 0,9 Skalenteile herabgesunken und bei $\mathfrak{H} = 10$ war selbst nach 0,0375 sec. von einer Nachwirkung nicht die Spur zu finden; die negative Zahl — 0,3 in der Tabelle bedeutet nämlich weiter nichts als die Differenz zweier Thermoströme. Der Eisenring dagegen weist selbst bei 10 Gauss eine sich auf mehrere Sekunden hinaus erstreckende, dann allerdings geringe, Nachwirkung auf. Eine mittlere Stellung zwischen Fe und 4,55 Si, wenn auch vermöge des nur geringen Siliziumgehaltes mehr nach Fe hinneigend, nimmt 0,61 Si ein: auch hier konnte z. T. nach 1 sec. noch eine Nachwirkung konstatiert werden, während andererseits die bei $\mathfrak{H} = 10$ ausgeführte Beobachtung deutlich die Abnahme gegenüber Fe bei derselben Feldstärke zeigt.

Die hier ermittelten Nachwirkungskurven lassen nun eine auffallende Ähnlichkeit mit den von Reinicke[2]) für einen massiven Nickelring erhaltenen erkennen. Infolgedessen wird die von Reinicke mit Beziehung auf die Rücker'schen Resultate ausgesprochene Behauptung: „im Gegensatz zu Eisen und Stahl charakterisieren sich die Nachwirkungskurven beim Nickel durch einen ungemein raschen, starken Abfall und ein sich daran ziemlich un-

1) Ich habe mich auf die Wiedergabe der Kurven für Fe beschränkt (Fig. 10), da die der anderen Eisensorten einen ganz ähnlichen Verlauf zeigen.

2) l. c. S. 46.

vermittelt anschliessendes langsames Abklingen“ in dieser allgemeinen Fassung wohl nicht zutreffen, vielmehr anzunehmen sein, dass, wenn überhaupt merkliche Nachwirkung vorhanden ist, diese bei Wahl genügend kleiner Zeitdifferenzen sich in jener stark abfallenden Form darstellen wird.

Was nun die Beziehung zwischen der Nachwirkung und dem Einfluss der Stufenzahl auf die Maximalinduktion anlangt, so ist allerdings ein Parallelismus zwischen beiden Erscheinungen insofern zu konstatieren, als beide beim Eisenring in grösster Stärke auftreten und mit steigendem Siliziumgehalte abnehmen. Aber innerhalb desselben Materials kann die Nachwirkung zur Erklärung wenigstens für einen Teil des Einflusses der Stufenzahl (etwa wie bei den Rückerschen Versuchen) angesichts ihrer geringen Grösse nicht herangezogen werden.

V. Kurze Zusammenfassung.

1. Es wurden vier Ringe untersucht, die bezw. aus gewöhnlichem Eisenblech und aus drei Proben legierten Bleches von verschiedenem Siliziumgehalte zusammengesetzt waren.

2. Die Aufstellung der normalen Magnetisierungskurven ergab:

Induktion und Permeabilität nehmen in schwachen Feldern mit wachsendem Siliziumgehalte bedeutend zu; in der Nähe der Sättigung tritt das Umgekehrte, doch in schwächerem Grade, ein.

Die Absolutwerte der Remanenz verhalten sich analog.

Die prozentuelle Remanenz ist für die Legierungen in schwachen Feldern höher, in stärkeren niedriger als für Eisen.

3. Der Einfluss der Stufenzahl auf die Maximalinduktion wird durch Silizium wesentlich herabgesetzt.

Das Gleiche gilt für die Koerzitivkraft und den Hysteresisverlust, abgesehen von ganz schwachen Induktionen, für welche sie durch Silizium eine Zunahme erfahren.

4. Die magnetische Nachwirkung ist bei allen Materialien ausgezeichnet durch einen innerhalb sehr kurzer Zeit erfolgenden raschen Abfall, dem bei gewöhnlichem Eisen ein länger (bis zu mehreren Sek.) dauerndes Abklingen von geringer Intensität folgt, das aber durch Silizium eine wesentliche Abkürzung erleidet.

Die Nachwirkung ist durchweg bei hohen Werten der Permeabilität am grössten und nimmt nach beiden Seiten bedeutend ab.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden von April 1908 bis März 1909 im Physikalischen Institute der Universität Halle durchgeführt.

Es ist mir zum Schlusse eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn, für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit und die mir bei ihrer Ausführung zuteil gewordene liebenswürdige Unterstützung meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

Lebenslauf.

Ich, Paul Ernst Martin Otto, bin am 27. April 1886 zu Moys, Kreis Görlitz, geboren als Sohn des Kaufmanns Max Albert Otto und seiner Ehefrau Emilie geb. Bellée. Ich bin evangelischer Konfession und preussischer Staatsangehörigkeit. Von Ostern 1892 ab besuchte ich zuerst 3 Jahre die Vorschule, dann das Gymnasium Augustum zu Görlitz, das ich Ostern 1904 mit dem Reifezeugnis verliess, um nunmehr an den Universitäten zu Heidelberg, Jena, Berlin und Halle Physik, Mathematik und Chemie zu studieren. Am 8. Juli 1909 bestand ich die mündliche Doktorprüfung.

Während meines Studiums hörte ich die Herren:

in Heidelberg:

M. Cantor, Curtius, Dieterich †, Koenigsberger, Quincke, Rathgen, Schuberg, Thode, Wolf;

in Jena:

Detmer, Eucken, Graef, Gutzmer, Haeckel, Knopf, Winkelmann;

in Berlin:

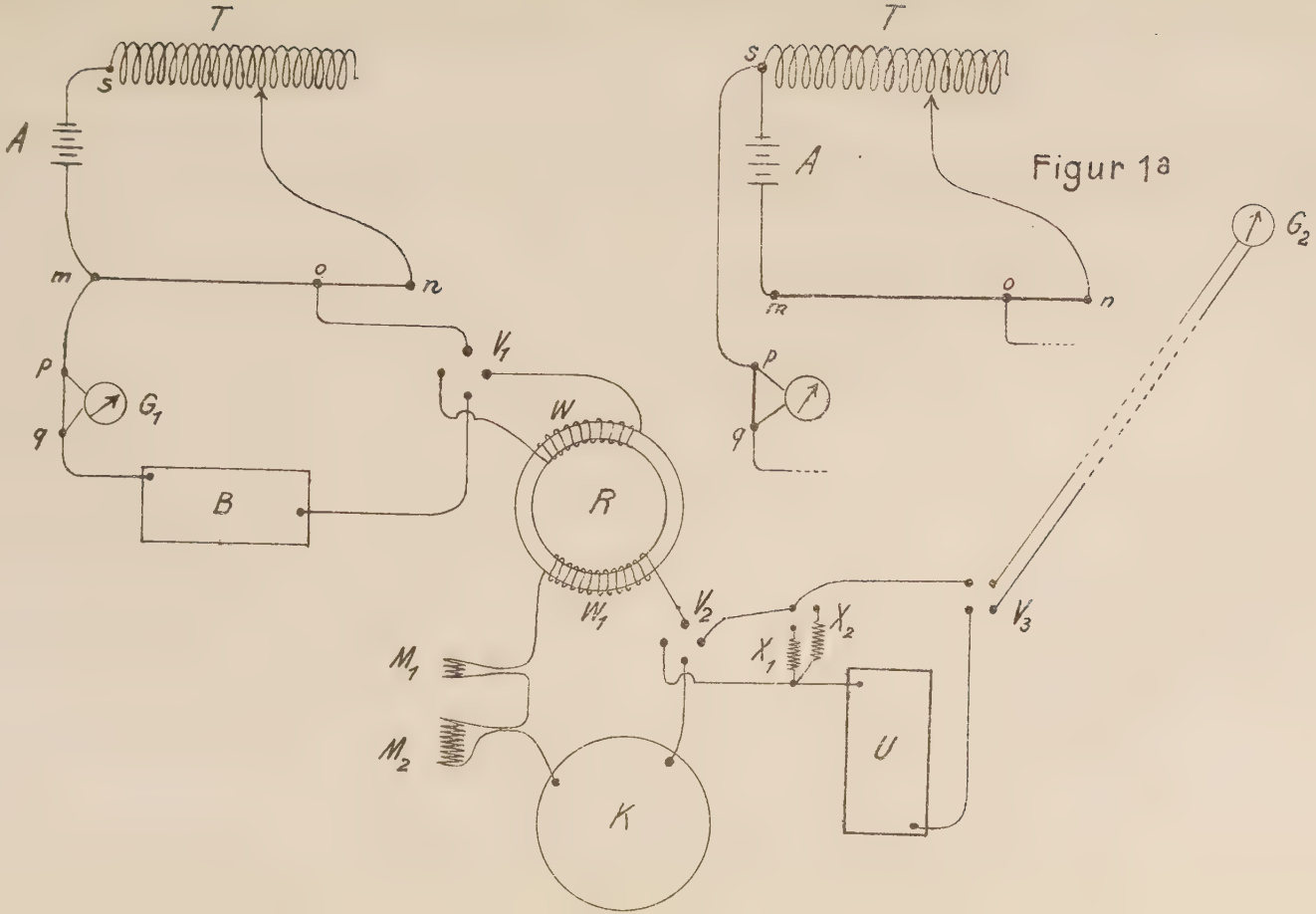
v. Bortkiewicz, Diels, Friedenthal, Helmert, Hettner, Knoblauch, Lasson, Less, Eugen Meyer, Pfleiderer †, Schur, H. A. Schwarz;

in Halle:

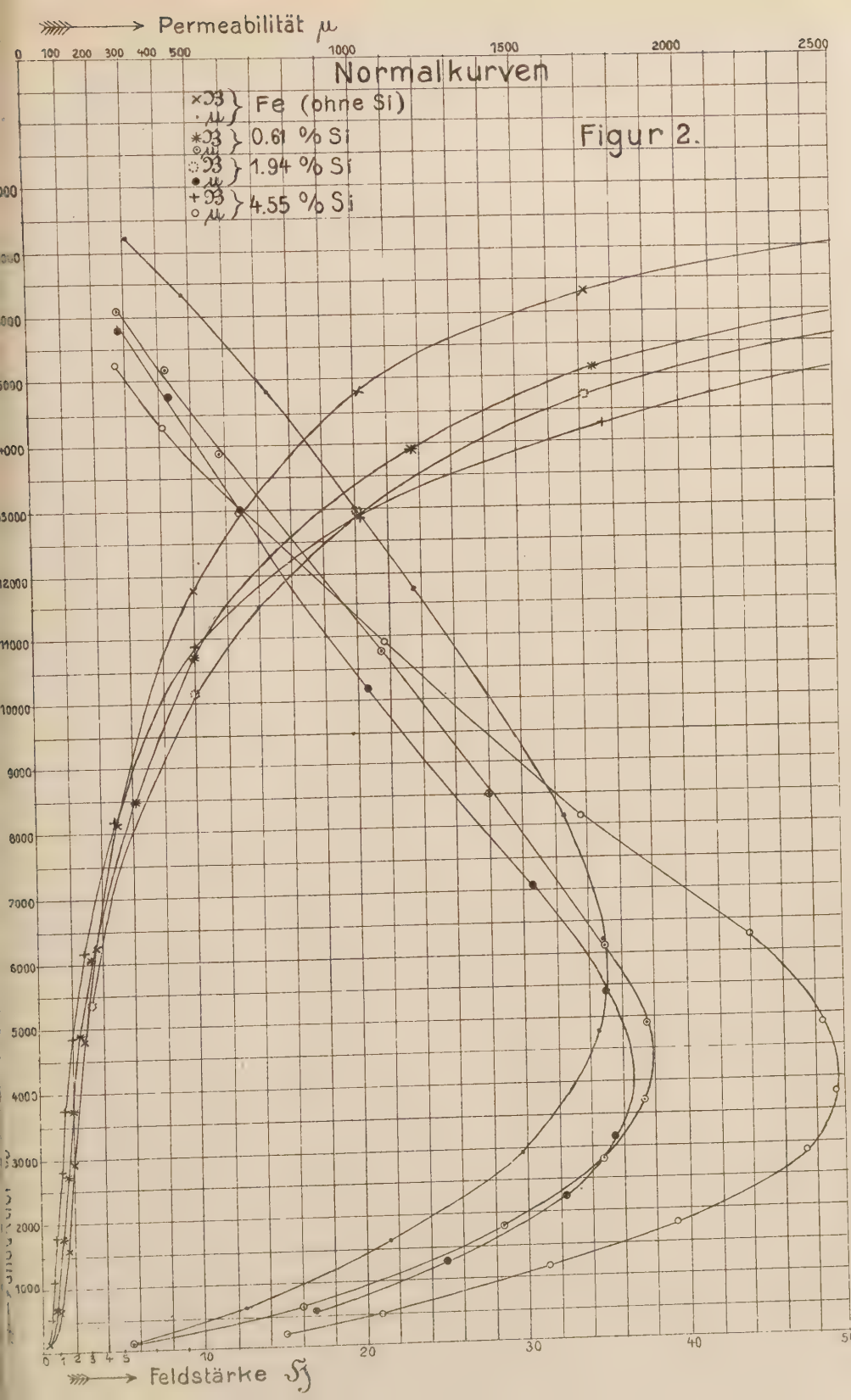
F. Bernstein, Doebner †, Dorn, Ebbinghaus †, Fries, Gutzmer, H. Schwarz, Scupin, Wangerin.

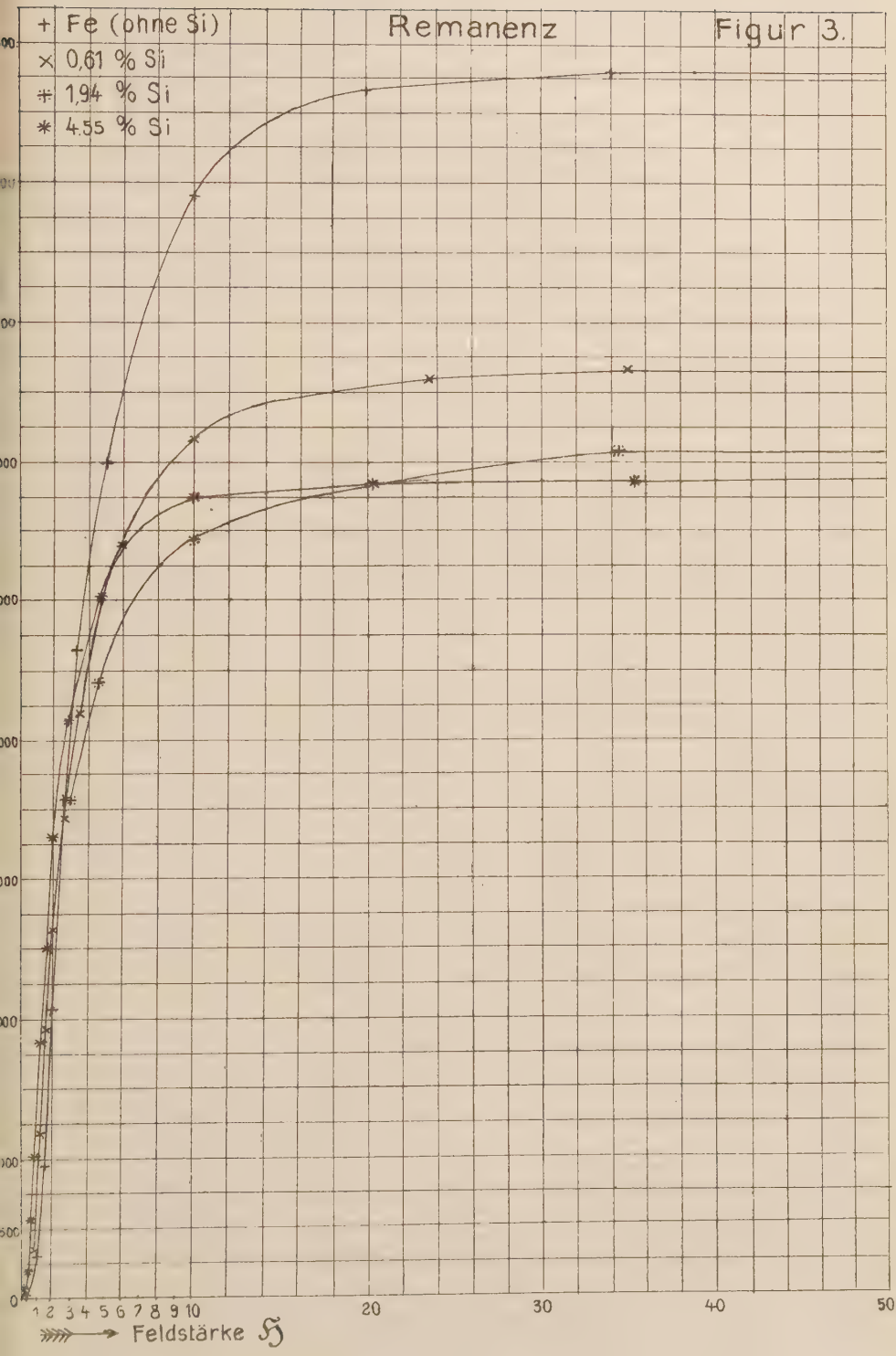
Alle diese meine verehrten Lehrer mögen meines dauernden Dankes versichert sein.

Figur 1.

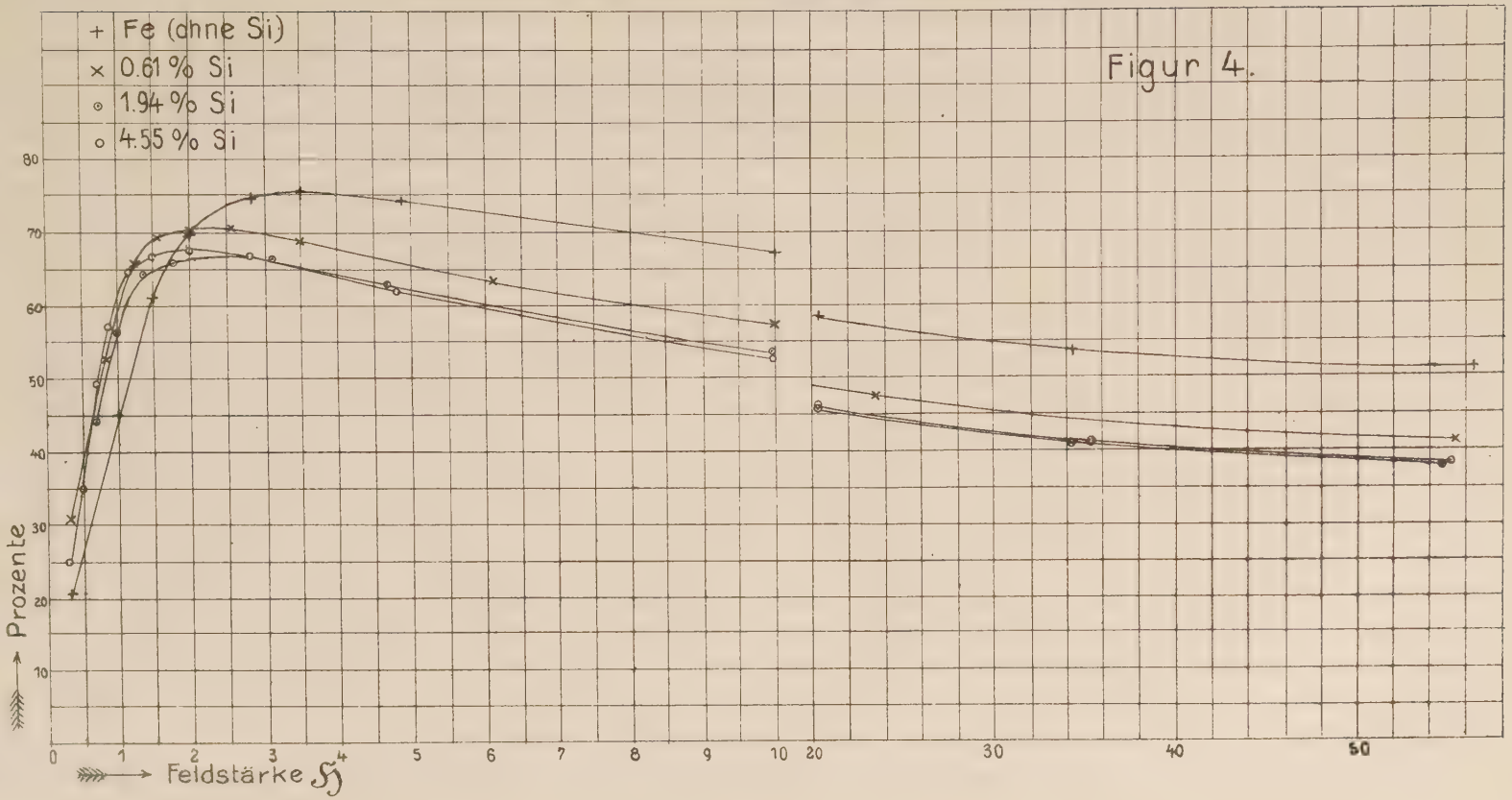


Figur 1a


Permeabilität μ
Normalkurven
Figur 2.
Fe (ohne Si)
0.61 % Si
1.94 % Si
4.55 % Si
Feldstärke Sj


+ Fe (ohne Si)
× 0,61 % Si
⁜ 1,94 % Si
* 4,55 % Si
Remanenz
Figur 3.
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
20
30
40
50
Feldstärke

Remanenz in Prozenten der Maximalinduktion.



Figur 4.

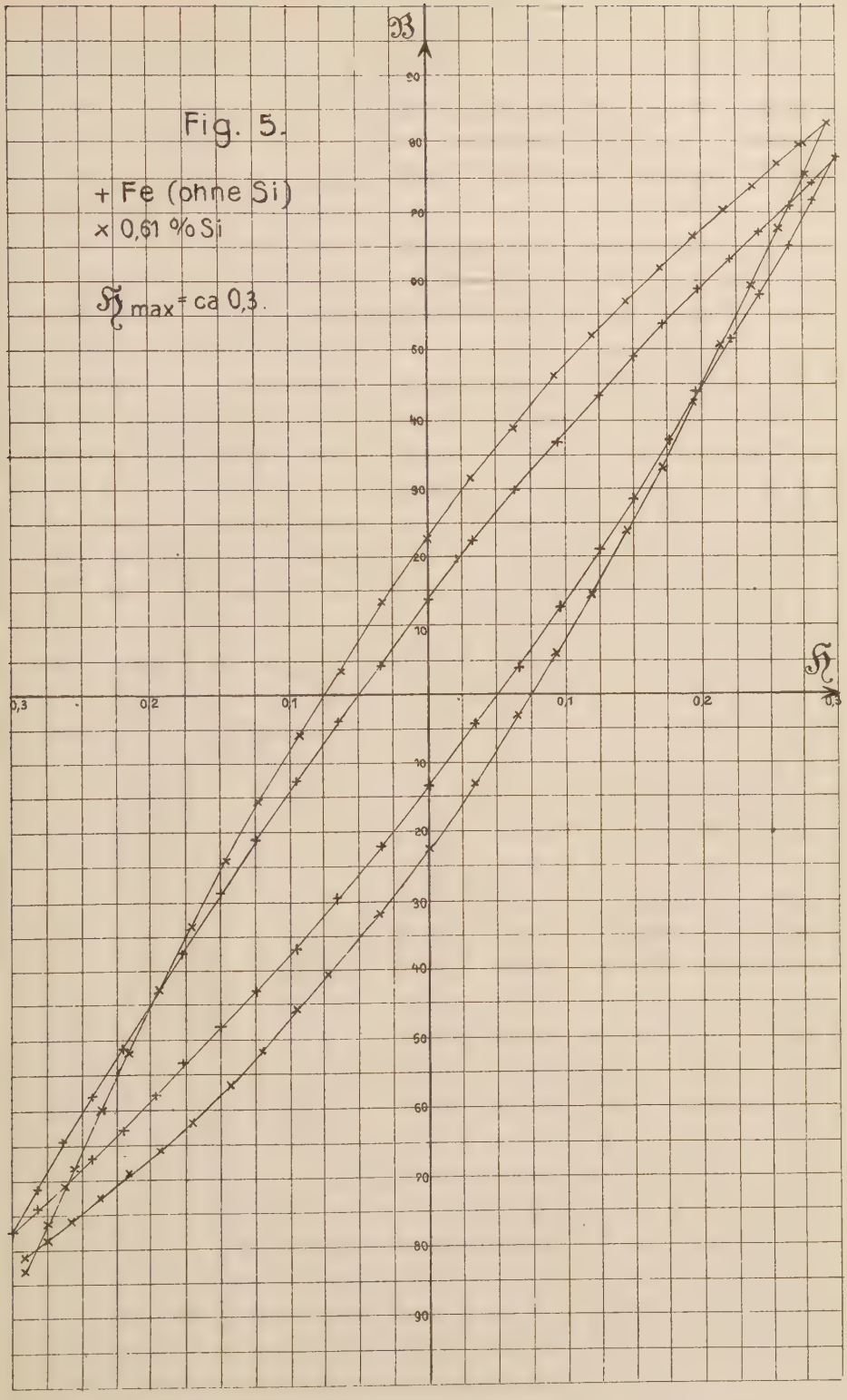
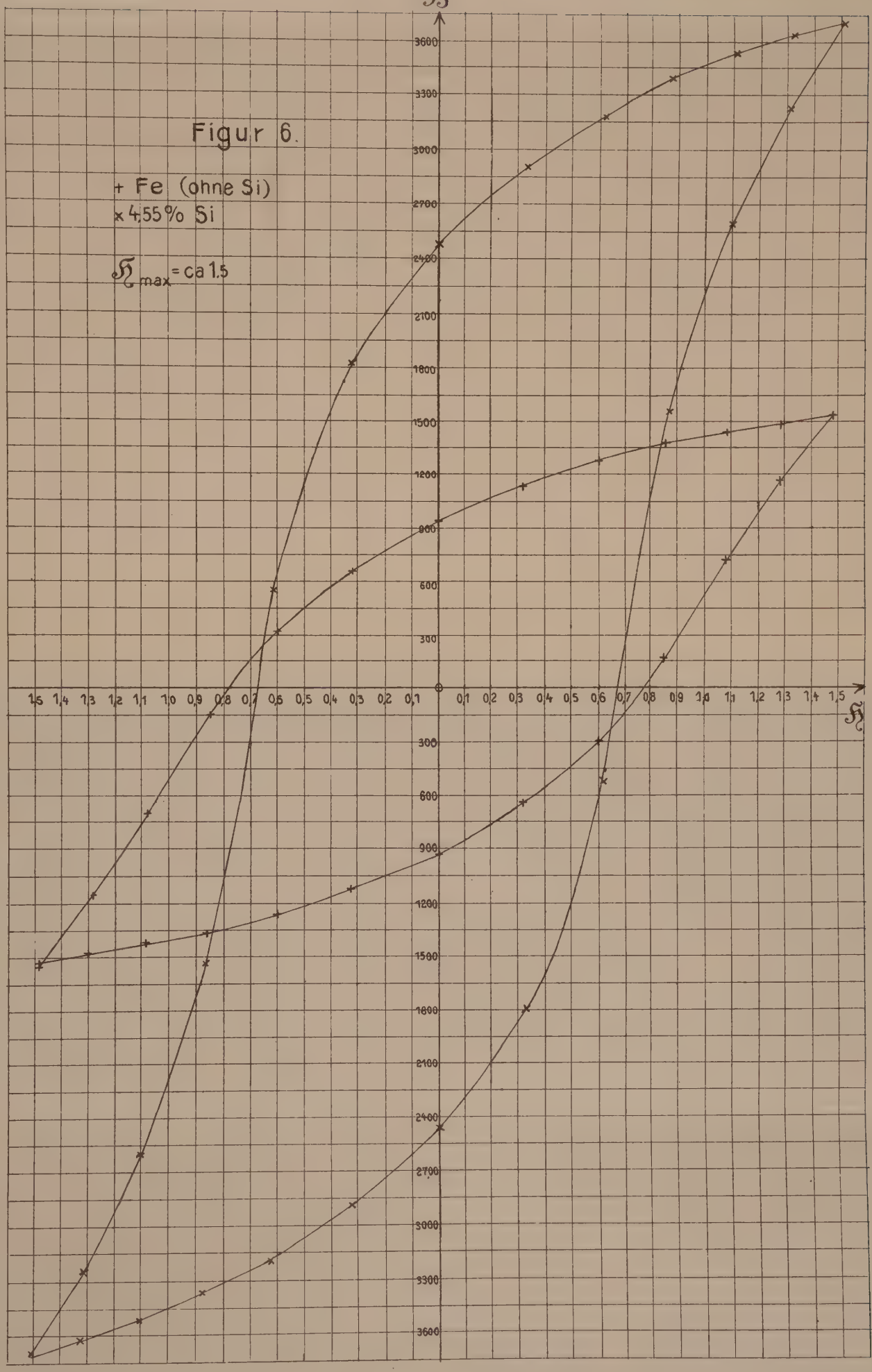


Fig. 5.
+ Fe (ohne Si)
× 0,61 % Si
$\mathfrak{H}_{max}$ = ca 0,3.
$\mathfrak{B}$
$\mathfrak{H}$
0,3
0,2
0,1
0,1
0,2
0,3


Figur 6.
+ Fe (ohne Si)
× 4,55% Si
$\mathfrak{H}_{max}$ = ca 1.5
3600
3300
3000
2700
2400
2100
1800
1500
1200
900
600
300
1,5 1,4 1,3 1,2 1,1 1,0 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1
0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5
$\mathfrak{H}$

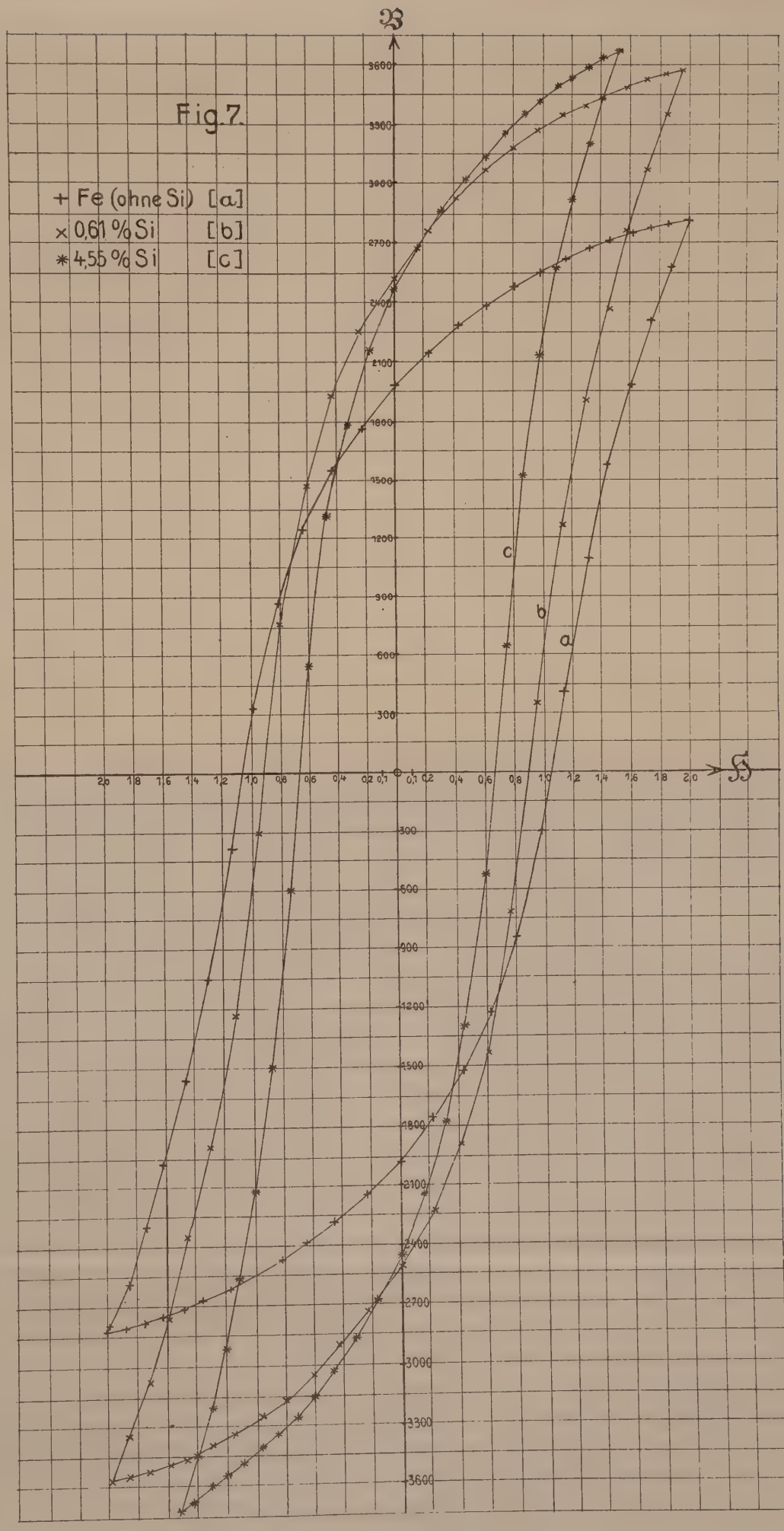


Fig.7.
+ Fe (ohne Si) [a]
× 0,61 % Si [b]
* 4,55 % Si [c]
B
H
a
b
c

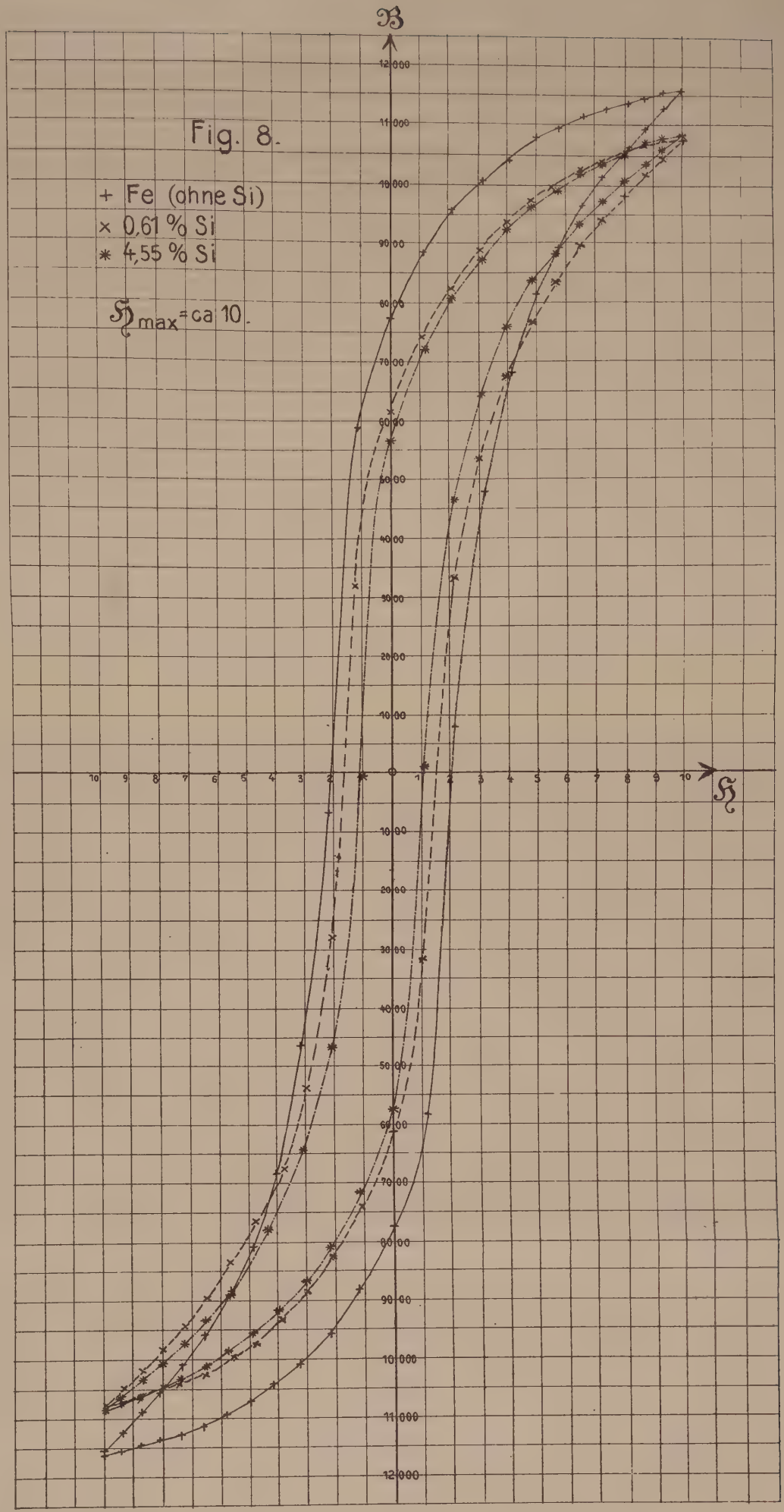
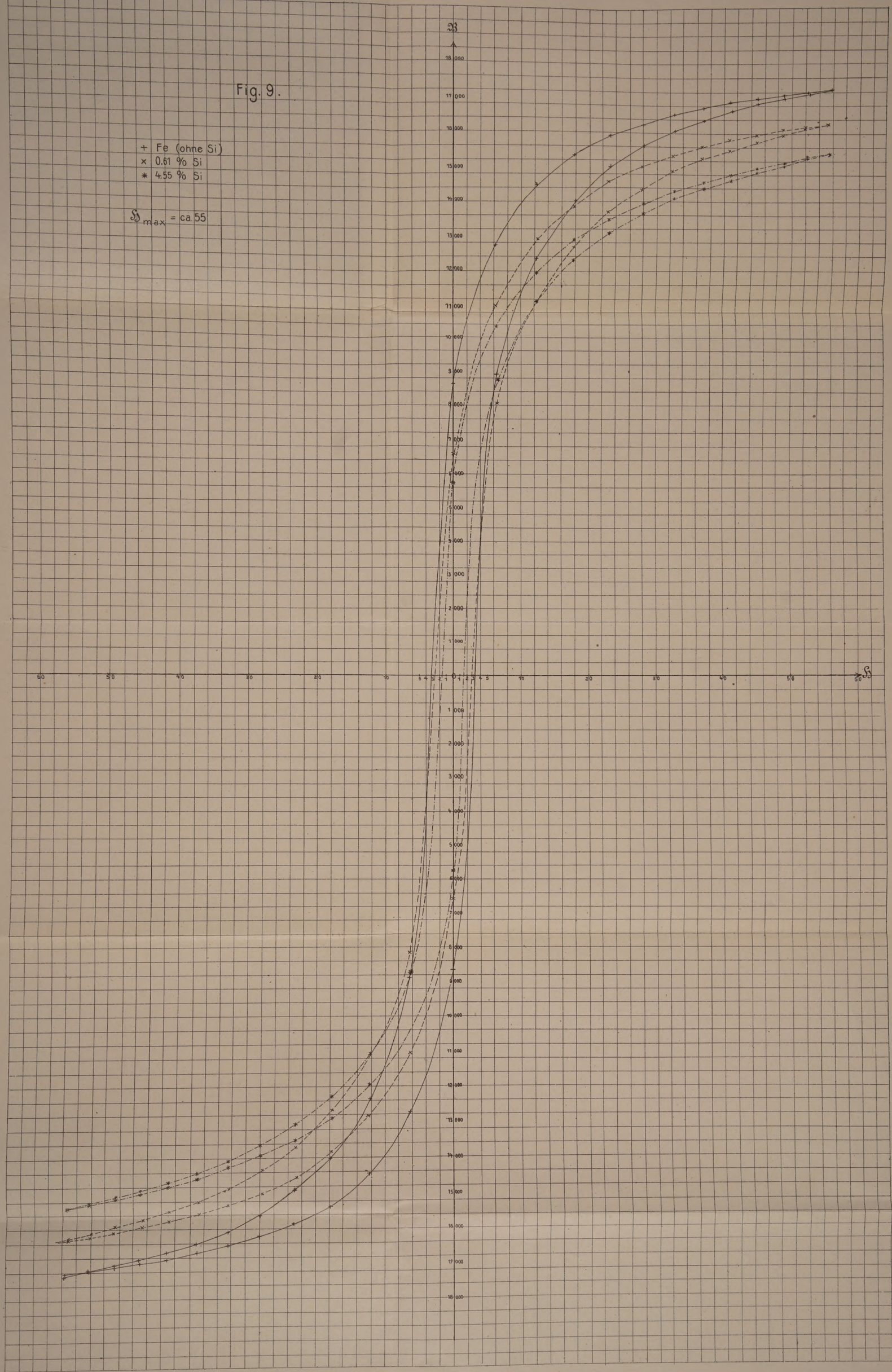
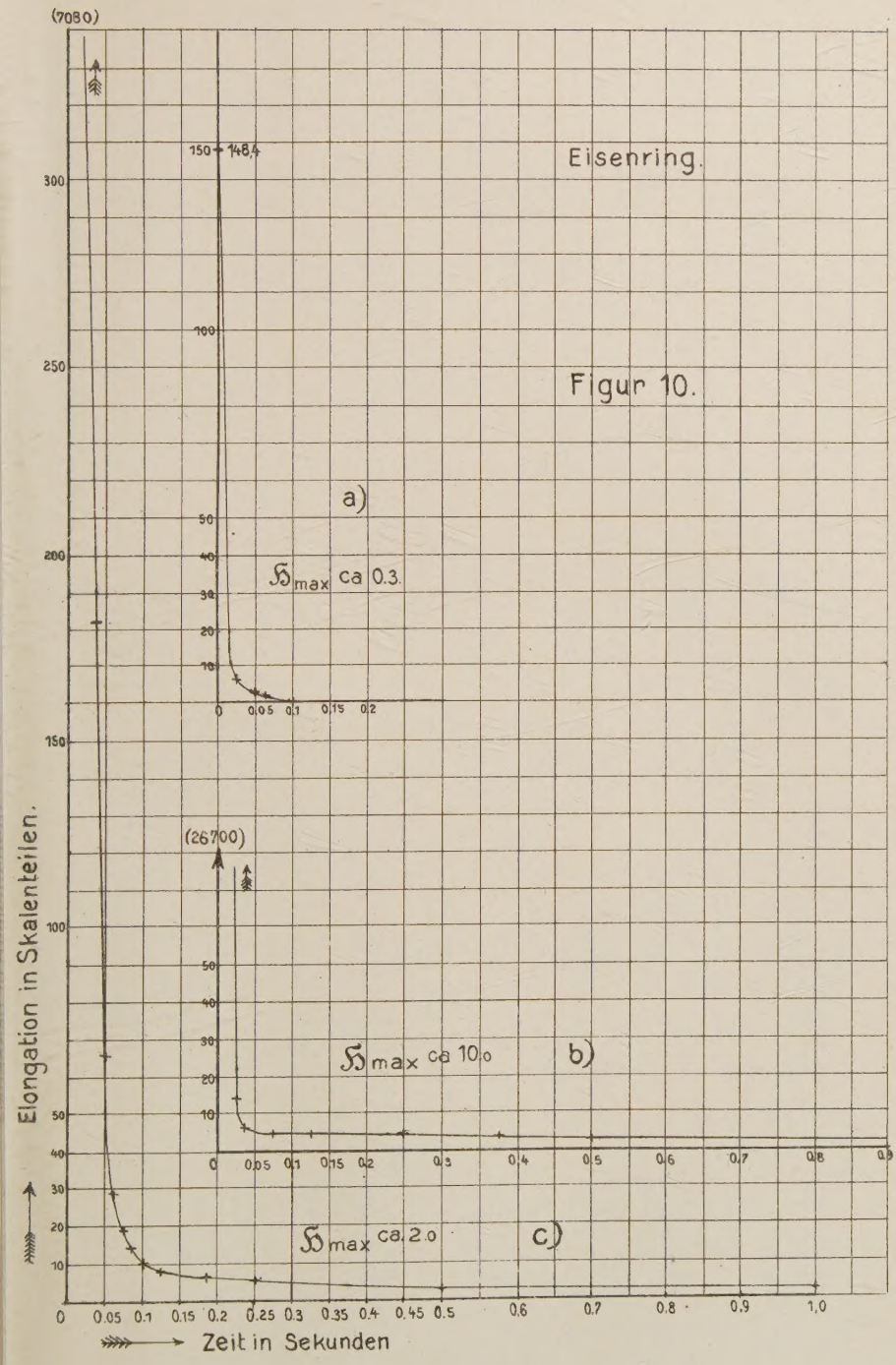


Fig. 8.
+ Fe (ohne Si)
× 0,61 % Si
* 4,55 % Si
$\mathfrak{H}_{max}$ = ca 10.
$\mathfrak{B}$
$\mathfrak{H}$

Fig. 9.


+ Fe (ohne Si)
× 0.61 % Si
* 4.55 % Si
$\mathfrak{H}_{max}$ = ca 55
$\mathfrak{B}$
$\mathfrak{H}$


(7080)
Eisenring.
Figur 10.
150
148,4
100
50
40
30
20
10
a)
$\mathfrak{H}_{max}$ ca 0.3.
0 0.05 0.1 0.15 0.2
(26700)
$\mathfrak{H}_{max}$ ca 10.0
b)
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9
$\mathfrak{H}_{max}$ ca. 2.0
c)
300
250
200
150
100
50
40
30
20
10
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
Elongation in Skalenteilen.
Zeit in Sekunden